

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**KATEDRA STAVEBNÍCH HMOT A DIAGNOSTIKY STAVEB**

# **Vliv pórovitosti a nasycení vodou na mechanické vlastnosti betonu**

**Influence of porosity and watersaturation to mechanical properties of concrete**

Student:

Lukáš Lajčík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Mec

Ostrava 2014

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

Podpis studenta

**Poděkování:**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Mecovi za ochotu a pomoc se zpracováním práce. Dále bych také vyjádřil dík všem pracovníkům laboratoře stavebních hmot FAST VŠB – TUO, zejména pak Ing. Janu Hurtovi za pomoc při experimentálním zkoušení vzorků.

**Anotace:**

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem pórovitosti a nasycení vodou na mechanické vlastnosti betonu. Pro potřeby práce byly navrženy 3 betonové směsi (receptury). Z každé receptury byly připraveny 3 záměsi, které se lišily pouze svou pórovitostí. Na vzorcích vytvořených z těchto záměsí byla experimentálně sledována jejich pórovitost a její vliv na mechanické vlastnosti betonu. Dále bylo u vzorků sledováno jejich nasycení vodou a následný vliv na pevnost betonu v tlaku.

**Klíčová slova:** Pórovitost; nasycení vodou; mechanické vlastnosti betonu

**Annotation:**

This thesis examines the influence of porosity and water saturation on the mechanical properties of concrete. For the purposes of this thesis were designed three concrete mixtures and from each mixture were prepared 3 mixes, which differed only in their porosity. The samples generated from these batches were experimentally monitored their porosity and its influence on the mechanical properties of concrete. For the samples was also monitored water saturation and his effects on compressive strength of concrete.

**Keywords:** Porosity; watersaturation; mechanical properties of concrete

## Obsah

Obsah.....	5
1 Úvod.....	9
2 Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti materiálů .....	10
3 Vliv nasycení vodou na mechanické vlastnosti.....	12
4 Teoretická část.....	13
4.1 Návrh složení betonové směsi .....	13
4.2 Kamenivo.....	15
4.3 Zdánlivá pórovitost.....	17
4.4 Zdánlivá hustota .....	17
4.5 Pevnost v tlaku.....	18
4.6 Modul pružnosti.....	19
4.7 Stanovení měrné hmotnosti .....	20
4.8 Stanovení skutečné pórovitosti.....	22
5 Experimentální část.....	23
5.1 Stanovení vlhkosti kameniva.....	23
5.2 Stanovení nasákavosti kameniva .....	24
5.3 Stanovení objemové hmotnosti kameniva .....	24
5.4 Stanovení zrnitosti kameniva.....	25
5.5 Návrh složení betonové směsi .....	29
5.6 Zkoušky čerstvého betonu .....	31
5.6.1 Stanovení konzistence betonové směsi – zkouška sednutím .....	31
5.6.2 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé betonové směsi – tlakoměrná metoda .....	33
5.6.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé ztuhlé betonové směsi.....	35
5.7 Zkoušení ztvrdlého betonu .....	38
5.7.1 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky.....	38
5.7.2 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením.....	39

5.7.3	Stanovení zdánlivé pórovitosti .....	44
5.7.4	Stanovení zdánlivé hustoty .....	47
5.7.5	Stanovení nasákavosti .....	50
5.7.6	Stanovení pevnosti v tlaku .....	53
5.7.7	Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou .....	60
5.7.8	Stanovení statického modulu pružnosti.....	64
5.7.9	Stanovení měrné hmotnosti .....	68
5.7.10	Stanovení skutečné pórovitosti.....	69
6	Diskuze výsledků .....	71
7	Závěr.....	85
8	Literatura: .....	86

## Seznam zkratek:

$a, b, c$ ...	rozměr strany krychle	[mm]
$A$ ...	zatěžovací plocha	[m <sup>2</sup> ]
$d$ ...	průměr válcového vzorku	[mm]
$f_c$ ...	pevnost betonu v tlaku	[MPa]
$f_{c,0}$ ...	pevnost betonu v tlaku při nulové pórovitosti	[MPa]
$E_{BU}$ ...	dynamický modul pružnosti	[GPa]
$E_c$ ...	statický modul pružnosti	[GPa]
$F$ ...	síla	[kN]
$h(S)$ ...	sednutí čerstvé betonové směsi	[mm]
$k$ ...	součinitel rovnoměrnosti prostředí	[-]
$m$ ...	hmotnost	[g, kg]
$m_c$ ...	hmotnost cementu	[g, kg]
$m_n$ ...	hmotnost nasáklého vzorku	[g, kg]
$m_{nw}$ ...	hmotnost vzorku váženého pod vodou	[g, kg]
$m_n$ ...	hmotnost nasáklého vzorku	[g, kg]
$m_p$ ...	hmotnost přísady	[g, kg]
$m_w$ ...	hmotnost vody	[g, kg]
$n$ ...	nasákavost	[%]
$OH$ ...	objemová hmotnost	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$PS$ ...	skutečná pórovitost	[%]
$PZ$ ...	zdánlivá pórovitost	[%]
$p$ ...	pórovitost	[%]
$v$ ...	výška válcového vzorku	[mm]
$v_L$ ...	rychlost ultrazvukového vlnění	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V$ ...	objem	[m <sup>3</sup> ]
$V_z$ ...	objem vzduchu	[m <sup>3</sup> ]
$W$ ...	vlhkost	[%]
$ZH$ ...	zdánlivá hustota	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$\rho$ ...	měrná hmotnost	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$\rho_c$ ...	objemová hmotnost cementu	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$\rho_k$ ...	objemová hmotnost kameniva	[kg .m <sup>-3</sup> ]



$\rho_p$ ...	objemová hmotnost přísad	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$\rho_v$ ...	objemová hmotnost čerstvé betonové směsi	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$ ...	objemová hmotnost vody	[kg .m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_a$ ...	horní zatěžovací napětí	[MPa]
$\sigma_b$ ...	dolní zatěžovací napětí	[MPa]
$\Delta\sigma$ ...	rozdíl napětí	[MPa]
$\Delta\varepsilon$ ...	rozdíl poměrného přetvoření	[-]
$\Delta\varepsilon_a$ ...	průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí	[-]
$\Delta\varepsilon_b$ ...	průměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí	[-]

## 1 Úvod

Beton patří dnes k nejpoužívanějším stavebním materiálům. Je považován za kompozitní materiál, který se skládá z plniva (nejčastěji kameniva) a pojiva (v tomto případě hydraulického pojiva – nejčastěji cementu), vody a popřípadě dalších přísad a příměsí.

Při provádění betonových konstrukcí je důležité sledovat mechanické vlastnosti betonu, ze kterého jsou vytvořeny, zejména pak pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti, jakožto hlavní parametry pro plnění nosné funkce. Dále je nutné brát zřetel na zpracovatelnost, trvanlivost a konzistenci betonové směsi. Tyto vlastnosti je velmi důležité sledovat, aby bylo možné konstrukce nadimenzovat na zatížení, kterému budou po celou dobu své životnosti odolávat.

Vlivem hydratace cementu vzniká ve výsledném produktu pevná matrice a pórová struktura [2]. Pórová struktura vzniká nemožností odstranit veškeré póry při výrobě. Často také v dnešní době je pórovitost v materiálu vytvářena úmyslně, především kvůli zlepšení jeho užitných vlastností. Pokud má materiál být vystaven prostředí, ve kterém může na konstrukci působit koroze vlivem střídavého působení mrazu, musí být do něj přidána provzdušňovací přísada. Provzdušnění betonu sice má pozitivní vliv na odolnost vůči mrazu, ale bohužel také negativní vliv na pevnost betonu v tlaku. Pokud dojde ke zvýšení provzdušnění o jedno procento, tak u 28denní pevnosti v tlaku dojde ke snížení přibližně o 5 % [3].

Práce se zaměřuje na sledování vlivu pórovitosti a nasycení vodou na betony běžných tříd, nikoliv na speciální druhy betonů (například na ultravysokopevnostní). Na vzorcích připravených podle navržených receptur byly sledovány jejich mechanické vlastnosti. Trvanlivost (mrazuvzdornost, odolnost proti CHRL) není předmětem zkoumání této práce. Zkoumán není také vliv času na mechanické vlastnosti. Všechny vzorky byly zkoušeny po 28 dnech, to zejména z důvodu potřeby velkého množství materiálu a také větší časové náročnosti.

## 2 Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti materiálů

Pomocí pórů lze určit mnoho informací o některých vlastnostech látky. Pórovitost vyjadřujeme podílem objemu pórů k celkovému objemu látky. Dále se může zjišťovat tvar pórů, jejich velikost a distribuce. Póry rozeznáváme otevřené průchodné, to jsou póry, které jsou schopny za normálních podmínek nasáknout vodu, póry otevřené neprůchodné, které pro vyplnění kapalinou potřebují být vystaveny značnému tlaku a póry uzavřené, které nelze zaplnit kapalinou.

Při zvyšování pórovitosti dochází k poklesu mechanických vlastností sledovaného materiálu. Tyto vlastnosti však nejsou závislé jen na pórovitosti, ale také na mechanických parametrech pevné matrice. V roce 1896 René Féret sestavil rovnici, pomocí které se snažil odvodit pevnost betonu  $f_c$  na základě absolutních objemů cementu ( $c$ ), vody ( $w$ ), vzduchu ( $a$ ) a zjištěné konstanty ( $K$ ). Tuto závislost definoval pomocí rovnice [6]:

$$f_c = K \cdot \left( \frac{c}{c + w + a} \right)^2 \quad (1.)$$

Na základě experimentů byly pro beton určeny vztahy, pomocí kterých lze za předpokladu znalosti pevnosti betonu při nulové pórovitosti  $f_{c,0}$ , a pórovitosti materiálu ( $p$ ) stanovit pevnost při určité pórovitosti. Z literatury lze uvést vztahy dle [6]:

Balshina:

$$f_c = f_{c,0} \cdot (1 - p)^n \quad (2.)$$

Ryskevitch:

$$f_c = f_{c,0} \cdot e^{-k \cdot p} \quad (3.)$$

Schillera:

$$f_c = k_s \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad (4.)$$

Hasselmann:

$$f_c = f_{c,0} - k_H \cdot p \quad (5.)$$

Autoři se pokusili tyto vztahy upravit pro jednotlivé materiály tak, aby jejich výsledky odpovídaly experimentálně určeným výsledkům. Pro beton lze takto upravené vztahy zapsat pomocí rovnic dle jednotlivých autorů [2]:

Balshina:

$$f_c = 68,74 \cdot (1 - p)^{8,15} \quad (6.)$$

Ryskevitch:

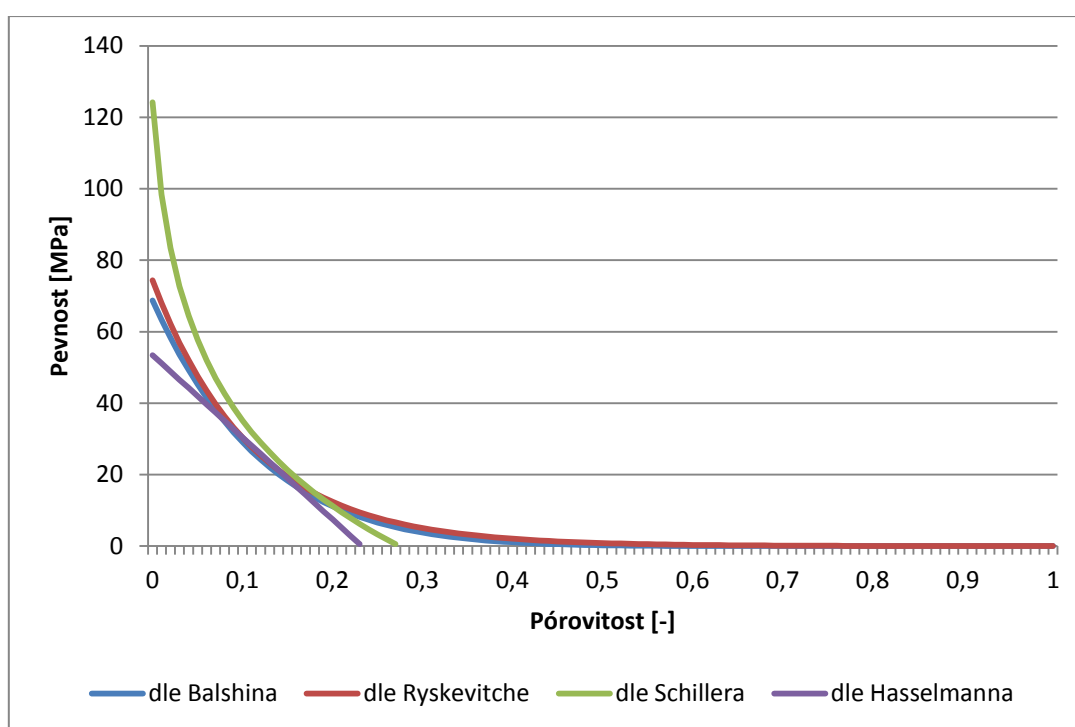
$$f_c = 74,4 \cdot e^{-8,96p} \quad (7.)$$

Schillera:

$$f_c = 37,1 \cdot \ln\left(\frac{0,284}{p}\right) \quad (8.)$$

Hasselmanna:

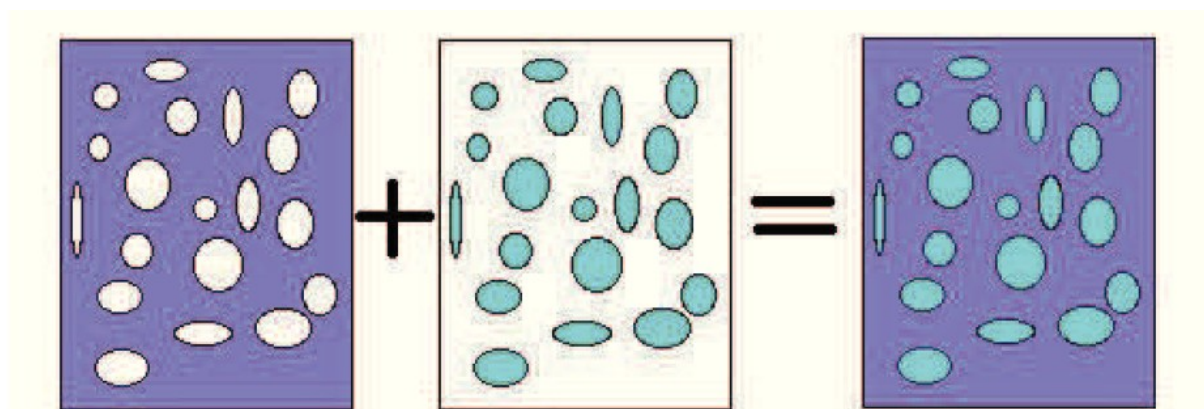
$$f_c = 53,45 - 230,1 \cdot p \quad (9.)$$



Obr. 1: Závislost pevnosti na pórovitosti dle jednotlivých autorů [2]

Z předchozího grafu je zřejmé, že uvedené vztahy jsou použitelné pouze v omezeném rozsahu pórovitosti. Při zvyšující se pórovitosti nad 50 % se již všechny křivky blíží nule.

Tato práce se zabývá pouze celkovým zastoupením pórů v látce, nikoliv distribucí velikosti pórů. Schematické zobrazení pevné matrice, pórové struktury a celého elementu látky je zobrazeno na (obr. 2).



Obr. 2: Schematické zobrazení pevné matrice, pórů a celého elementu [8]

### 3 Vliv nasycení vodou na mechanické vlastnosti

Beton, který je zkoušený ve vysušeném stavu obvykle dosahuje vyšších pevností, než stejný beton, který je zkoušen ve stavu nasyceném vodou. V literatuře se uvádí, že poměr pevností zjištěných na nasycených a vysušených vzorcích dosahuje hodnoty 0,8, výjimečně až 0,6 [10]. Pevnost je ovlivněna vodou, která je obsažena v pórové struktuře materiálu. Podle charakteru fyzikální a chemické vazby se jedná o vodu mechanicky vázanou, kapilární, obsaženou v gelových strukturách a vodu hydratovanou (chemicky vázanou). Mechanicky vázaná voda a voda kapilární se může odpařovat při teplotách kolem 105 °C, zatímco voda obsažená v gelových strukturách a voda hydratovaná se neodpařuje téměř vůbec [10].

## 4 Teoretická část

Pro potřeby této práce byly navrženy tři receptury betonové směsi, které odpovídaly požadavkům na beton dle normy ČSN EN 206-1 [4]. První receptura byla navržena pro beton třídy C30/37, druhá pro beton třídy C16/20 a třetí pro C80/95. Podle každé receptury byly připraveny tři záměsi, které se lišily pouze množstvím použitého provzdušňovačla. Provzdušňující přísada byla přidána kvůli jednoduchému zvýšení obsahu vzduchu v betonové směsi. První záměs každé receptury byla připravena bez jeho přidání, do druhé bylo přidáno provzdušňovačlo o hmotnosti 0,05 % hmotnosti cementu použitého v receptuře a do třetí se přidala provzdušňovací přísada o hmotnosti 0,1 % hmotnosti cementu. Tímto způsobem bylo dosaženo různého provzdušnění betonových směsí. Takto bylo vytvořeno celkově 9 různých záměsí. Provzdušňující přísada přidaná do receptury byla zvolena od firmy BASF Micro – Air 103 (technický list viz příloha1).

### 4.1 Návrh složení betonové směsi

Návrh betonové směsi závisí na požadované výsledné pevnosti v tlaku betonu. Dále je nutné zjistit objemové hmotnosti použitého kameniva, cementu a dalších případně použitých přísad a příměsí, granulometrické složení kameniva, jeho vlhkost. Po zjištění všech potřebných vstupních hodnot je možné přistoupit k samostatnému návrhu betonové směsi. Návrh byl proveden podle metody empirického množství vody. Takto bylo navrženo složení všech tří betonových směsí. Záměsi jsou označeny datem přípravy, poslední číslo jejich označení znamená množství přidané provzdušňující přísady.

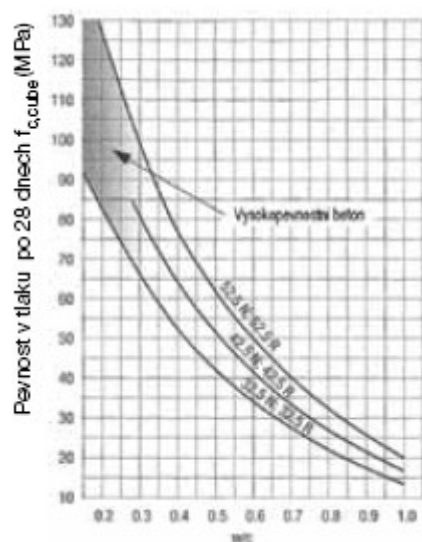
Návrh betonové směsi podle empirického množství vody se provede následujícím způsobem. Z nomogramu (obr. 3) se odečte vodní součinitel ( $W$ ) pro navrhovanou pevnostní třídu betonu. Z tabulky (obr. 4) se pro zvolenou křivku zrnitosti a předpokládanou konzistenci betonové směsi určí potřebné množství vody ( $m_w$ ). Množství cementu se určí užitím vztahu:

$$m_c = \frac{m_w}{W} \quad (10.)$$

Množství kameniva se vypočte užitím rovnice absolutních objemů:

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p} = 1 - \frac{V_z}{100} \quad (11.)$$

Podle zvolené křivky zrnitosti se určí množství jednotlivých frakcí. Z těchto hodnot lze sestavit recepturu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi [1]. Tato receptura se následně přepočítala na navrhované potřebné množství betonové směsi. Pro potřeby této práce byla každá záměs namíchána v objemu 35 dm<sup>3</sup>.



Obr. 3: Nomogram pro určení vodního součinitele na základě navrhované pevnosti [1]

konzis- tence	křivka zrnitosti											
	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	C <sub>8</sub>	A <sub>16</sub>	B <sub>16</sub>	C <sub>16</sub>	A <sub>32</sub>	B <sub>32</sub>	C <sub>32</sub>	A <sub>63</sub>	B <sub>63</sub>	C <sub>63</sub>
C 0	160	178	197	139	160	183	133	152	171	123	139	163
S 1	166	184	205	145	166	189	137	158	177	127	145	169
S 2	176	194	217	155	176	200	145	167	188	135	155	180
S 3	192	212	235	170	192	217	159	181	207	148	170	197
S 4	204	227	250	181	204	232	171	197	223	159	181	211

Obr. 4: Tabulka potřeby vody v l na 1 m<sup>3</sup> betonu na požadovanou konzistenci [1]

## 4.2 Kamenivo

Kamenivo tvoří nosnou kostru betonu. Je důležité, aby kamenivo mělo co nejmenší mezerovitost. Proto je pro návrh receptur betonu používáno různých frakcí kameniva tak, aby bylo dosaženo co nejnižší mezerovitosti.

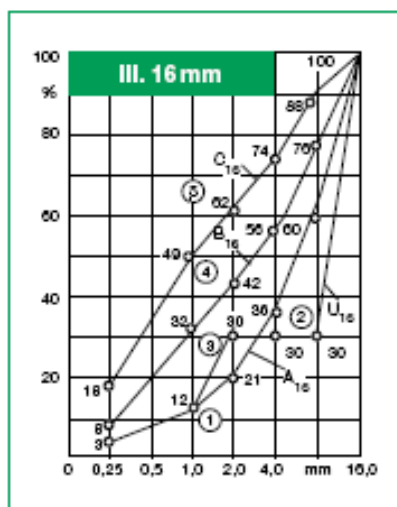
K přípravě betonových směsí bylo použito kamenivo frakce 0/4 těžené Tovačov, frakce 4/8 takéž těžené Tovačov a frakce 8/16 drcené Bohučovice. Jednotlivá kameniva jsou vyfocena na (obr. 5).



Obr. 5: Kamenivo frakce 0/4; 4/8 a 8/16

Veškeré kamenivo použité pro přípravu betonu dle ČSN EN 206 – 1 [4] musí být deklarováno podle ČSN EN 12 620 [22]. Tato norma však pouze stanovuje deklarované úrovně určité vlastnosti, nikoli jejich požadovanou minimální nebo maximální hodnotu [1].

K návrhu receptury je podstatné znát křivku zrnitosti kameniva. Křivka zrnitosti kameniva pro maximální zrno kameniva velikosti 16 mm je zobrazena na (obr. 6). Pro její správný návrh by se křivka zrnitosti měla pohybovat ideálně v oblasti 3 [1].



Obr. 6: Ideální křivka zrnitosti pro kamenivo s maximálním zrnem kameniva 16 mm.



Křivky zrnitosti jsou popisovány pomocí modulů, vyjadřujících jemnost kameniva. Pro kamenivo se stejným modulem se předpokládá dosažení stejné výsledné pevnosti betonu a také toto kamenivo vyžaduje stejné množství vody potřebné k ovlhčení svého povrchu. Každému kamenivu lze určit k modul a D modul, jejich výpočet vyjadřují následující vztahy:

k modul:

$$k = \sum z_i / 100 \quad (12.)$$

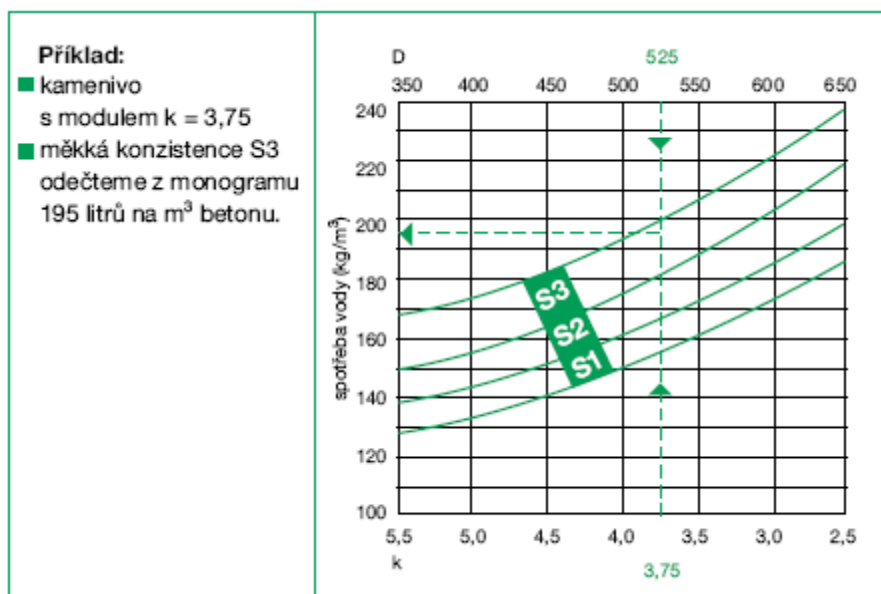
D modul:

$$D = \sum y_i = (m - k) \cdot 100 \quad (13.)$$

Hodnoty modulů pro různé čáry zrnitosti jsou vyjádřeny v (obr. 7). Na základě jejich hodnot lze navrhnout k určené konzistenci betonové směsi zjistit množství vody k jejímu dosažení (obr. 8).

čára zrnitosti	modul zrnitosti k	D – součet	F – hodnota
A <sub>8</sub>	3,64	536	134
B <sub>8</sub>	2,89	611	111
C <sub>8</sub>	2,27	673	92
A <sub>16</sub>	4,61	439	163
B <sub>16</sub>	3,66	534	134
C <sub>16</sub>	2,75	625	107
A <sub>32</sub>	5,48	352	189
B <sub>32</sub>	4,20	480	151
C <sub>32</sub>	3,30	570	123

Obr. 7: Hodnoty modulů pro hraniční čáry zrnitosti [1]



Obr. 8: Množství vody potřebné k dosažení navržené konzistence betonu na základě k modulu kameniva [1]

### 4.3 Zdánlivá pórovitost

Zdánlivá pórovitost udává poměr objemu otevřených pórů k celkovému objemu tělesa včetně všech pórů [7]. Otevřenými póry se rozumí všechny póry, které jsou tvořeny pevnou látkou, a do kterých může proniknout kapalina z vnějšího prostředí. Pro potřeby této práce byla zdánlivá pórovitost stanovena pomocí vody za normálního atmosférického tlaku. Tímto způsobem je možné změřit pouze póry s velikostí, do kterých může za normálního atmosférického tlaku proniknout voda. U pórů s menší velikostí (mikropóry), které není možné změřit tímto způsobem, by musela být provedena jiná zkouška k určení pórovitosti materiálu, například pomocí rtuťové nebo heliové porozimetrie [8].

### 4.4 Zdánlivá hustota

Zdánlivá hustota (ZH) udává hmotnost jednotkového objemu vysušeného vzorku včetně všech uzavřených pórů. Pokud by vzorek neobsahoval žádné uzavřené póry, potom by se zdánlivá hustota rovnala skutečné hustotě (měrné hmotnosti) [7].

#### 4.5 Pevnost v tlaku

Beton je používán převážně jako konstrukční materiál, proto je pevnost považována za hlavní kritérium k jeho posuzování. Pevností betonu se rozumí mezní napětí vznikající v betonu, při kterém může dojít ke globálnímu porušení jeho soudržnosti. Obecně lze říct, že je to schopnost vzdorovat vzniklým napětím. Většina konstrukcí je namáhána kombinací tlakových, tahových a smykových napětí, které v konstrukcích vyvolávají všechny zatížení, kterým je konstrukce vystavena a pak také vlivem podepření konstrukce. Pokud některé napětí vznikající v konstrukci překročí mez pevnosti, dojde v konstrukci k porušení soudržnosti. Toto porušení může být lokální, kdy nedojde k zasažení celého průřezu a vznikne pouze trhлина. Ovšem jestliže dojde k porušení globální soudržnosti, to znamená v celém průřezu, dojde k destrukci celé konstrukce [10].

Beton je kompozitní látka a její vlastnosti jsou určeny vlastnostmi složek, ze kterých je složen. Jedná se o vlastnosti zejména kameniva a cementového tmele a jejich poměrnému zastoupení v betonu. Běžně používané kamenivo dosahuje pevnosti 60 – 300 MPa, čímž dosahuje vyšší pevnosti než většina běžně vyráběných betonů, takže dosahované vlastnosti betonu ovlivňuje především svým tvarem a granulometrickým složením. Je žádoucí takový podíl kameniv, jehož granulometrie vykazuje nejmenší mezerovitost. Kvalita cementového kamene je charakterizována zejména jeho pórovitostí a vodním součinitelem. Se zvyšujícím se vodním součinitelem je možné očekávat snižující se pevnost betonu. Navržené množství cementového kamene musí být takové, aby obalilo povrch zrn kameniva a zároveň i vyplnilo všechny mezery mezi zrny [10].

Dále je pevnost betonu ovlivněna vnějšími podmínkami, při kterých dochází k tvrdnutí betonu. Nejdůležitější roli hraje vlhkost prostředí a jeho teplota. Pokud je beton uložen ve vlhkém prostředí, může dále trvale hydratovat. Jako nejlepší je považováno uložení betonu ve vodě. Při dostatku vody dochází k úplnější hydrataci, která zapříčiňuje zmenšení velikosti kapilárních pórů. Nízká teplota znamená pro beton zpomalení procesu hydratace. Při teplotách kolem +5 °C se hydratace portlandského cementu téměř zastavuje. Při teplotách pod bodem mrazu se hydratace zastavuje úplně, dochází k tvorbě ledu ve struktuře a může dojít i k destrukci betonu. Optimální teplota pro zrání betonu je uváděna mezi +10 až +30 °C [10].

Betonové vzorky, které jsou nasycené vodou, obvykle vykazuje nižší pevnosti, než betonové vzorky vyrobené ze shodné záměsi, které byly ovšem před provedením zkoušky vysušené [10].



Obr. 9: Zkušební lis používaný k určení pevnosti v tlaku

#### 4.6 Modul pružnosti

Modul pružnosti  $E$  je možné definovat jako poměr napětí a jím vyvolaného poměrného přetvoření. V počátku zatěžování je závislost napětí na přetvoření lineární, při vyšším zatížení začne modul pružnosti klesat. Dynamický modul pružnosti se stanovuje nedestruktivně pomocí přístroje, který do tělesa přenáší ultrazvukové vlnění. Při nedestruktivním stanovení modulu pružnosti není beton vystavený reálnému zatížení, tím pádem se ve zkoušeném vzorku nevyskytují žádná napětí, nedochází ke vzniku mikrotrhlin. Z tohoto důvodu vycházejí hodnoty dynamického modulu pružnosti větší než hodnoty statického modulu pružnosti. Vzhledem k tomu, že je beton značně heterogenní látka a principy stanovení těchto dvou modulů pružností jsou zcela odlišné, není možné určit přesný vztah k přepočtu dynamického modulu pružnosti na statický. Navzdory této skutečnosti se v literatuře objevují určité empirické vztahy mezi těmito moduly pružnosti [11].

#### 4.7 Stanovení měrné hmotnosti

Měrná hmotnost ( $\rho$ ) nebo také skutečná hustota vzorků vyjadřuje hmotnost jednotkového objemu vzorku bez pórů. Vzorky ke zkoušce byly odebrány z porušených těles po stanovení jejich pevnosti v tlaku. Od každé záměsi byly vždy vybrány dva vzorky, které se připravily ke zkoušce stanovení měrné hmotnosti. Zkouška se provádí pyknometrickou metodou pomocí pyknometru (obr. 10). Nejprve je nutné určit hmotnost prázdného vysušeného pyknometru včetně zátky – hmotnost  $m_1$ . Vybrané vzorky je potřeba nadrtit na čelistovém drtiči (obr. 11) a následně pomlít v mlýnu (obr. 12). Takto připravené pomleté vzorky (obr. 13) se vloží do pyknometru a určí se hmotnost pyknometru se zátkou naplněného vzorkem – hmotnost  $m_2$ . Poté se pyknometr naplní demineralizovanou vodou a uzavře zátkou tak, aby v něm nezůstal žádný vzduch a pyknometr se opět zváží – hmotnost  $m_3$ . Předpokladem je, že hydratovaný cement po 28 dnech již pouze minimálně reaguje s vodou, a výsledky tak nejsou hydratací výrazněji zkresleny. Pyknometr se vypláchne a naplní se po okraj pouze demineralizovanou vodou, opět se určí jeho hmotnost  $m_4$ . Z takto naměřených hmotností se pomocí vztahu spočte měrná hmotnost vzorku[19]:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 - m_1 + m_2} \cdot \rho_w \quad (14.)$$

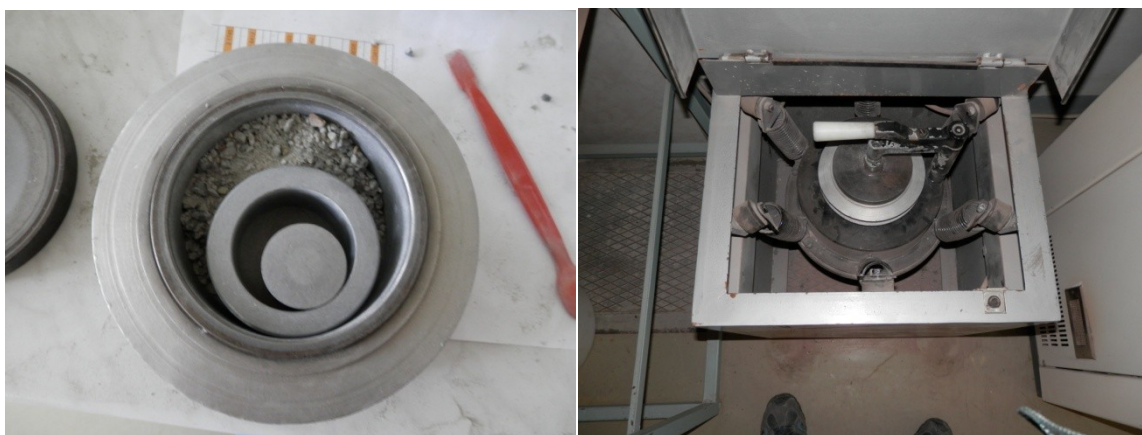


Obr. 10: Pyknometr se zátkou

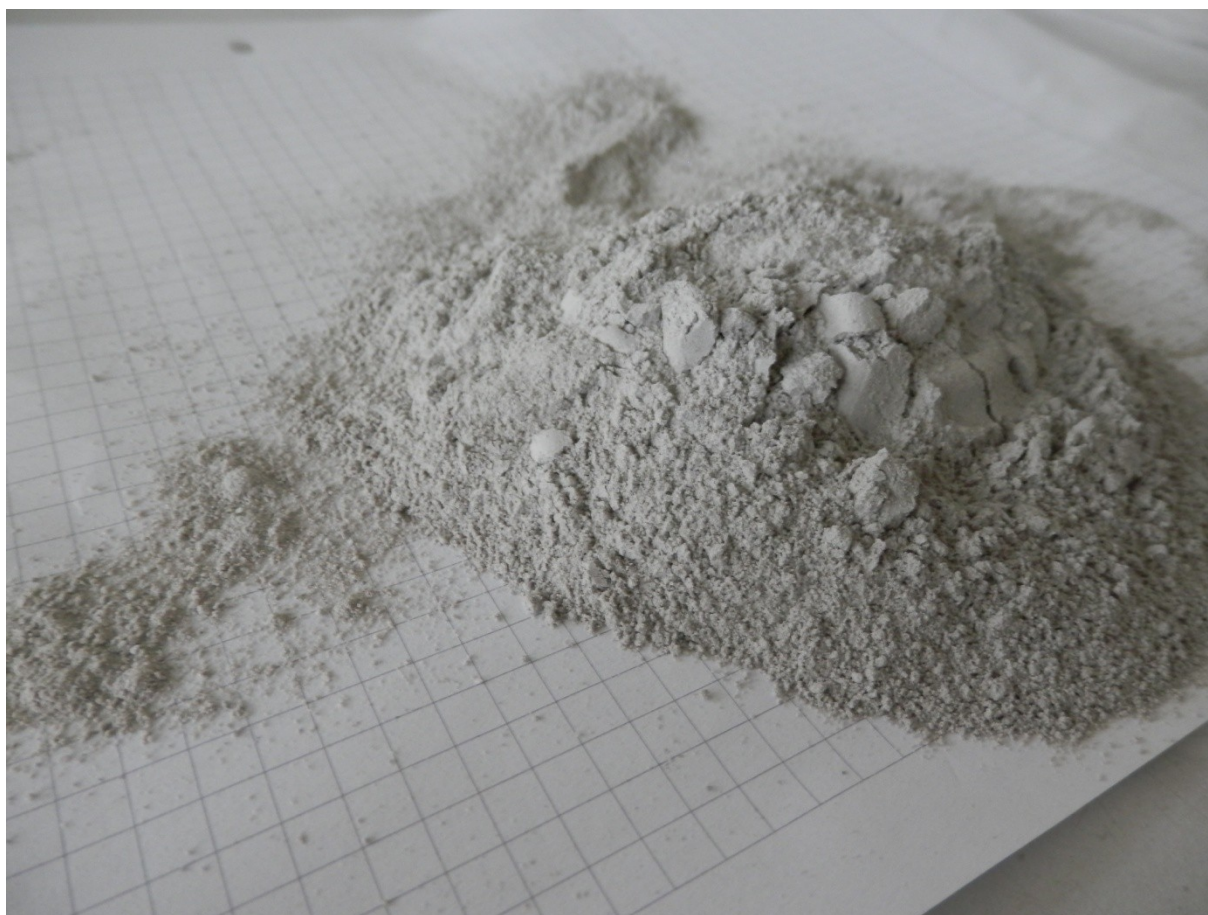




Obr. 11: Čelistový drtič



Obr. 12: Otevřený mlýn naplněný nadrceným kamenivem a uzavřený mlýn připravený k mletí



Obr. 13: Pomletý vzorek připravený k pyknometrické zkoušce

#### 4.8 Stanovení skutečné pórovitosti

Skutečná pórovitost udává poměr objemu všech pórů, jak otevřených, tak uzavřených k celkovému objemu tělesa. Skutečná pórovitost (PS) se stanoví výpočtem z již zjištěných hodnot objemové (OH) a měrné ( $\rho$ ) hmotnosti jednotlivých záměsí. Výpočet se provede pomocí vzorce [19]:

$$PS = \frac{\rho - OH}{\rho} \cdot 100 \quad (15.)$$

Takto vypočtená skutečná pórovitost se udává v procentech.

## 5 Experimentální část

### 5.1 Stanovení vlhkosti kameniva

Znalost vlhkosti kameniva je podstatná pro návrh betonové směsi, neboť voda obsažená v kamenivu zvyšuje vodní součinitel. U kameniva, které je vystaveno povětrnostním vlivům, může být jeho vlhkost značná, tím pádem dochází k podstatnému zvýšení vodního součinitele, což má za následek snížení výsledné pevnosti betonu [1].

Vlhkost kameniva byla určena dle normy ČSN EN 1097-5 [13]. Zkouška se provádí zvážením hmotnosti kameniva ( $m$ ), následně se kamenivo vysuší v sušárně, než se dosáhne jeho ustálené hmotnosti. Takto vysušené kamenivo se zváží ( $m_s$ ) a vypočte se jeho vlhkost jako poměr hmotnosti vody obsažené v kamenivu k hmotnosti vysušeného vzorku vztahem [13]:

$$W = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (16.)$$

V následující tabulce (tab. 1) jsou uvedeny naměřené hodnoty a vypočtené hodnoty vlhkostí jednotlivých frakcí kameniva.

Tab. 1: Stanovení vlhkosti kameniva

vzorek	hmotnost prázdné misky [g]	hmotnost nevysušeného kameniva + misky [g]	hmotnost vysušeného kameniva + misky [g]	vlhkost [%]
0/4	188	1504	1466	2,97
4/8	141	1783	1752	1,92
8/16	199	1615	1608	0,50



## 5.2 Stanovení nasákavosti kameniva

Nasákavost kameniva byla určena dle normy ČSN EN 1097-6 [14]. Kamenivo bylo nejdříve vysušeno v sušárně do ustálené hmotnosti. Byla zaznamenána hmotnost vysušeného kameniva  $m_s$ . Poté se kamenivo nechá 24 ve vodě a určí se hmotnost nasáklého kameniva  $m_n$ . Nasákavost kameniva se následně spočte použitím vztahu [14]:

$$n = \frac{m_n - m_s}{m_s} \quad (17.)$$

Následující tabulka (tab. 2) shrnuje naměřená data a následně z nich vypočtené hodnoty nasákavosti.

Tab. 2: Stanovení nasákavosti kameniva

vzorek	hmotnost prázdné misky [g]	hmotnost vysušeného kameniva + misky [g]	hmotnost kameniva nasáklého vodou + misky [g]	nasákavost [%]
0/4	106	1484	1587	7,47
4/8	111	1722	1769,5	2,95
8/16	105	1514	1567	3,76

## 5.3 Stanovení objemové hmotnosti kameniva

Objemová hmotnost kameniva je potřebnou hodnotou k návrhu receptury betonové směsi. Tato hodnota se dosazuje do rovnice absolutních objemů a díky její znalosti je možné spočítat množství kameniva potřebné k přípravě 1 m<sup>3</sup> betonové směsi.

Objemová hmotnost kameniva byla určena pyknometrickou metodou. Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN 1097-6 [14]. Objemová hmotnost se stanovuje v pyknometru (obr. 14). Nejprve byla zvážena navážka kameniva v přirozené vlhkosti – hmotnost  $m_1$ . Navážka se vložila do pyknometru, který se doplnil do stanovené úrovně vodou a zjistila se jeho hmotnost ( $m_1$ ). Poté se vzorek kameniva z pyknometru vyjmul, pyknometr se vypláchnul a naplnil se vodou. Pyknometr naplněný pouze vodou se zvážil – hmotnost  $m_2$ . Poté se vypočetla objemová hmotnost navážky za pomoci vztahu [14]:

$$\rho_k = \frac{m_1}{m_1 - (m_2 - m_3)} \cdot \rho_w \quad (18.)$$



Obr. 14: Pyknometr

Příložená tabulka (tab. 3) obsahuje experimentálně naměřená data a z nich spočtené hodnoty objemové hmotnosti jednotlivých frakcí kameniva.

Tab. 3: Stanovení objemové hmotnosti kameniva

vzorek	hmotnost navážky kameniva - $m_1$ [g]	hmotnost pyknometru naplněného vodou a kamenivem $m_2$ [g]	hmotnost pyknometru naplněného vodou - $m_3$ [g]	$\rho_k$ [Mg . m <sup>-3</sup> ]
0/4	1387	10 918,0	10 096,5	2,45
4/8	1442	10 960,0	10 096,5	2,49
8/16	1407	10 972,0	10 096,5	2,65

#### 5.4 Stanovení zrnitosti kameniva

Sítovým rozbořem se určuje granulometrické složení kameniva. Zrnitost kameniva se určuje dle normy ČSN EN 933-1 [21]. Zkouška se provádí na prosévacím zařízení (obr. 15) s normovou řadou sít. Navážky kameniva se zváží a umístí se do prosévacího zařízení. Po proběhnutí prosévacího cyklu se zváží kamenivo zachycené na jednotlivých sítích a vyjádří se procentuální propad jednotlivými sítí [21].

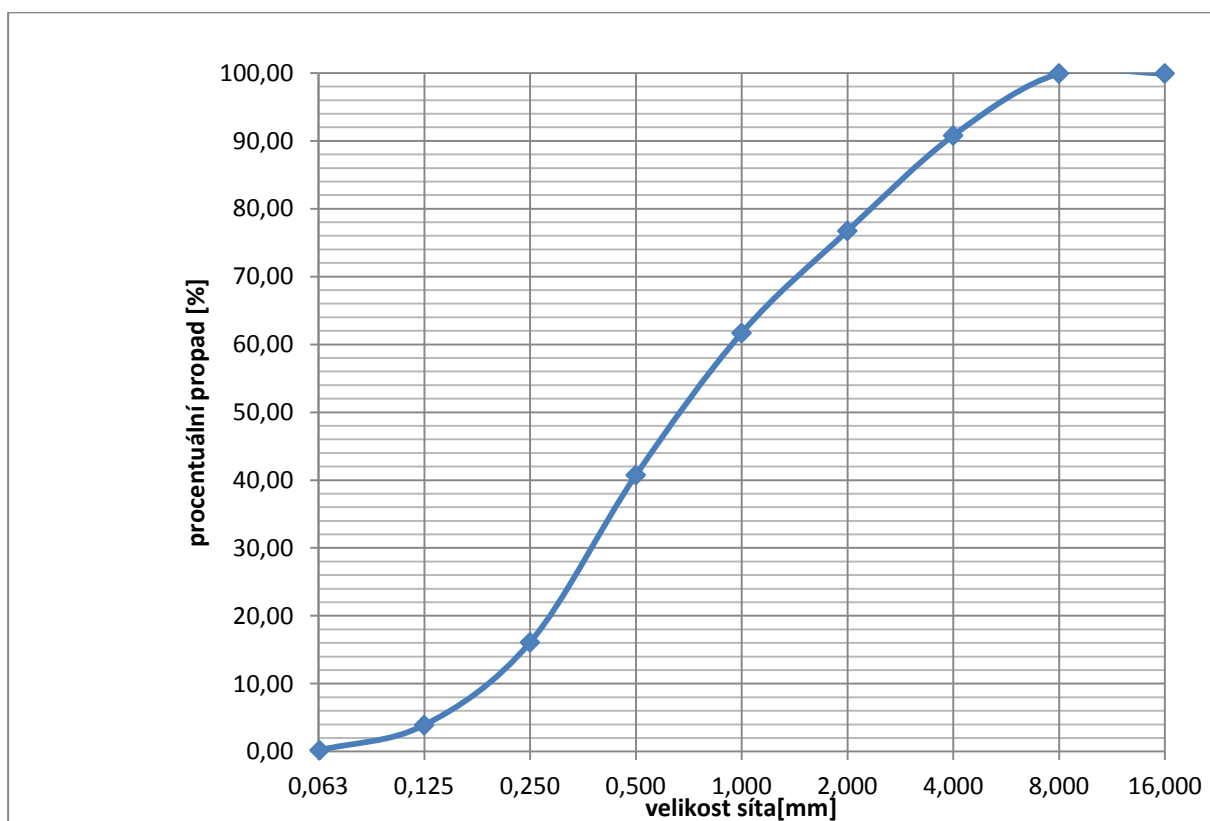


Obr. 15: Prosévací zařízení

Pro každou frakci kameniva použitého k přípravě betonové směsi byla zjištěna křivka zrnitosti. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v (tab. 4 – 6) a výsledky jsou zpracovány do grafické podoby (obr. 16-18).

Tab. 4: Naměřené hodnoty propadu síty těženého kameniva Tovačov frakce 0/4

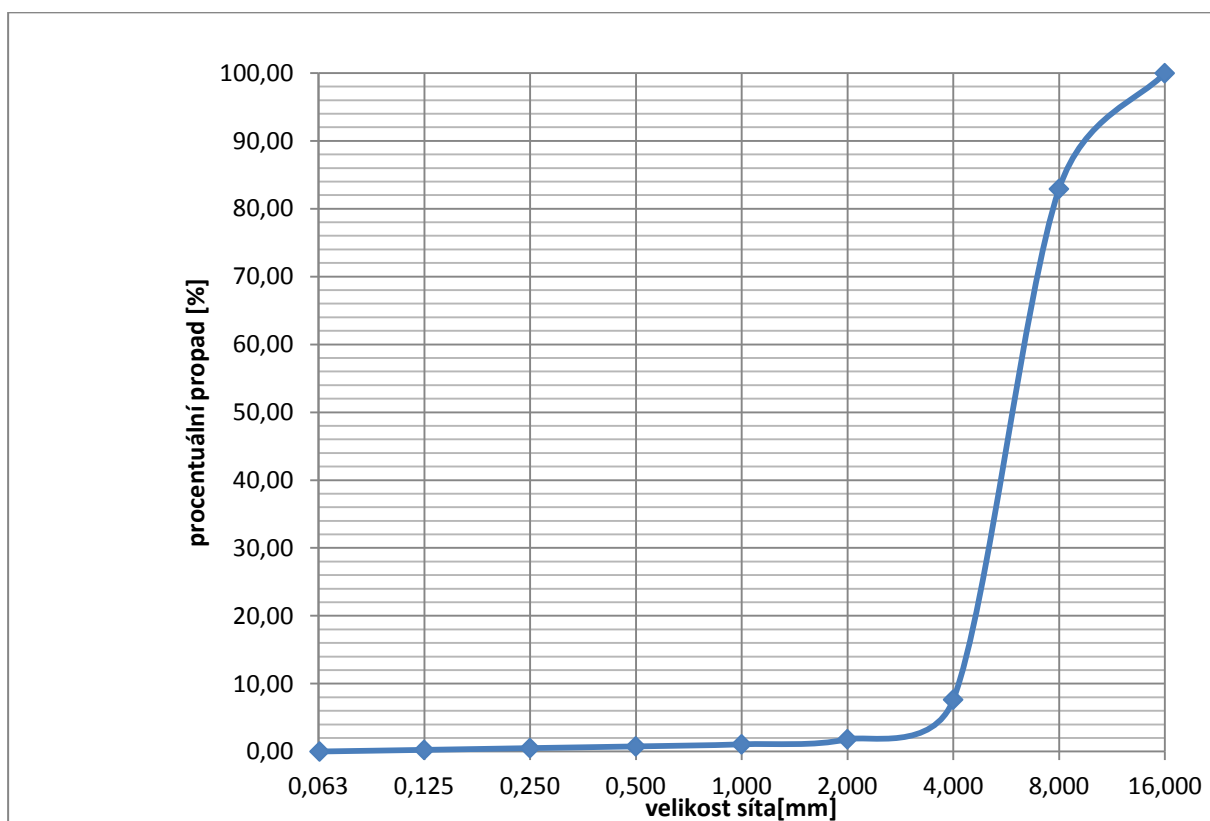
síta (mm)	hmotnost na sítu (g)	hmotnostní propad (g)	zůstatek % na sítu	% propad
16	0	399,8	0	99,95
8	0	399,8	0	99,95
4	36,6	363,2	9,15	90,80
2	56,2	307	14,05	76,75
1	60,2	246,8	15,05	61,70
0,5	83,8	163	20,95	40,75
0,25	98,6	64,4	24,65	16,10
0,125	48,8	15,6	12,2	3,90
0,063	14,8	0,8	3,7	0,20
0	0,8	0,0	0,2	0,00
celkem	399,8	g		
hmotnost kameniva		400	g	



Obr. 16: Křivka zrnitosti těžného kameniva Tovačov frakce 0/4

Tab. 5: Naměřené hodnoty propadu síty těžného kameniva Tovačov frakce 4/8

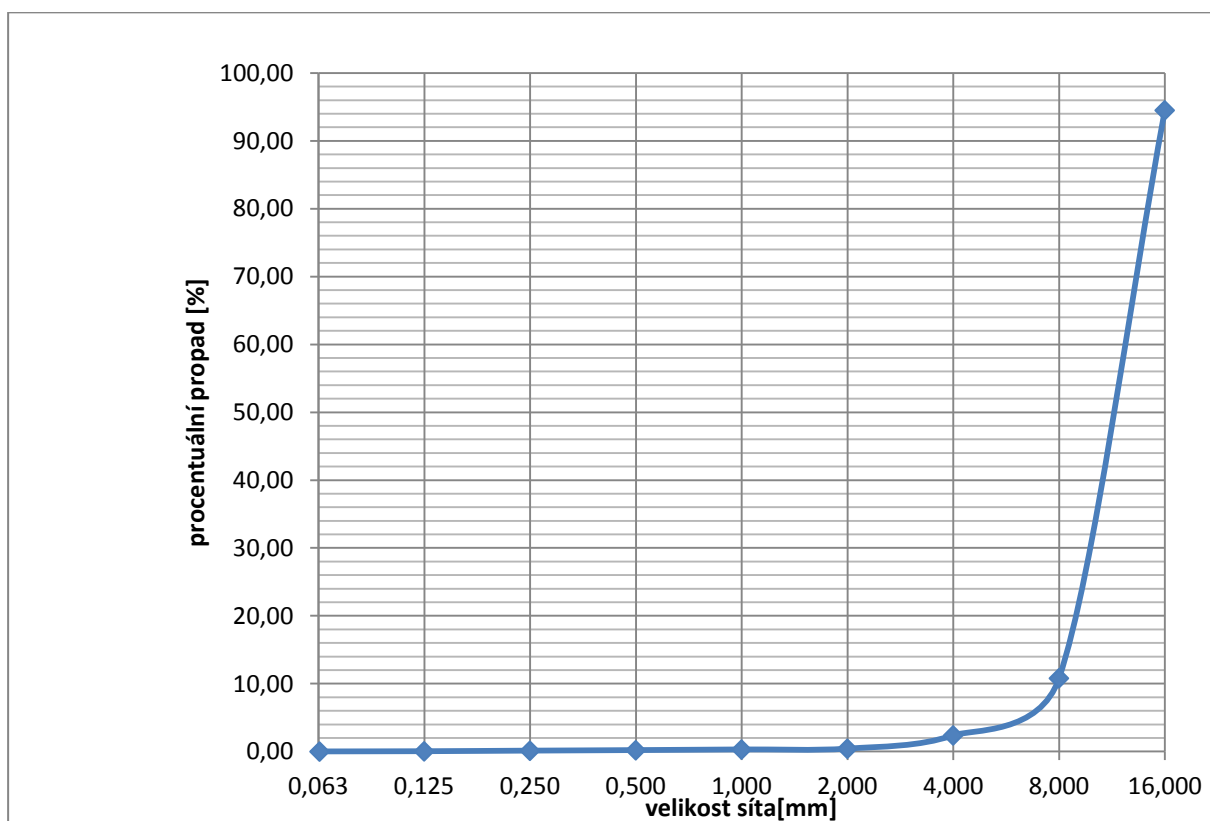
síta (mm)	hmotnost na sítu (g)	hmotnostní propad (g)	zůstatek % na sítu	% propad
16	0	999,9	0	99,99
8	170,6	829,3	17,06	82,93
4	752,7	76,6	75,27	7,66
2	58,3	18,3	5,83	1,83
1	7,5	10,8	0,75	1,08
0,5	3,1	7,7	0,31	0,77
0,25	2,5	5,2	0,25	0,52
0,125	2,6	2,6	0,26	0,26
0,063	2,4	0,2	0,24	0,02
0	0,2	0,0	0,02	0,00
celkem	999,9	g		
hmotnost kameniva		1000	g	



Obr. 17: Křivka zrnitosti těžného kameniva Tovačov frakce 4/8

Tab. 6: Naměřené hodnoty propadu síty drceného kameniva Bohučovice frakce 4/8

síta (mm)	hmotnost na sítu (g)	hmotnostní propad (g)	zůstatek % na sítu	% propad
16	164,7	2835,2	5,49	94,51
8	2511,1	324,1	83,70	10,80
4	252,7	71,4	8,42	2,38
2	58,7	12,7	1,96	0,42
1	3,6	9,1	0,12	0,30
0,5	3	6,1	0,10	0,20
0,25	2,4	3,7	0,08	0,12
0,125	2,5	1,2	0,08	0,04
0,063	1	0,2	0,03	0,01
0	0,2	0,0	0,01	0,00
celkem	2999,9	g		
hmotnost kameniva		3000	g	



Obr. 18: Křivka zrnitosti drceného kameniva Bohučovice frakce 8/16

## 5.5 Návrh složení betonové směsi

Na základě zjištěných parametrů kameniva mohou být navrženy receptury betonových směsí. Postup jejich návrhu je popsán v kapitole 4.1. Návrh receptur pro betony tříd C30/37, C 16/20 a C80/95 je zpracován do (tab. 7) a množství provzdušňovadla přidaného do jednotlivých záměsí je uvedeno v (tab. 8).

Tab. 7: Navržené složení betonové směsi

navržená betonová směs	použité složky		hmotnost na přípravu 1 m <sup>3</sup> betonové směsi [kg]	hmotnost na přípravu 35 l betonové směsi[kg]	úprava
C30/37	cement Hranice CEM I 42,5R		340	11,90	přidáno 0,6 l vody ⇒ celkem 5,96 l
	voda		153	5,36	
	kamenivo:	0/4 - těžené	897	31,43	
		4/8 - těžené	372	13,02	
		8/16 - drcené	526	18,41	
C16/20	cement Hranice CEM V/A (S-V) 32,5R		240	8,4	-
	voda		155	5,425	
	kamenivo:	0/4 - těžené	677	23,695	
		4/8 - těžené	451	15,785	
		8/16 - drcené	752	26,32	
C80/95	Cement Hranice CEM I 52,5R		455	15,925	-
	voda		140	4,9	
	kamenivo:	0/4 - těžené	687	24,045	
		4/8 - těžené	138	4,83	
		8/16 - drcené	1057	36,995	
	plastifikátor		6,3	0,2205	
	mikrosilika		32	1,12	

Tab. 8: Označení záměsí a množství přidané provzdušňující přísady

navržená betonová směs	označení záměsí	množství přidané provzdušňující přísady [g]
C30/37	28. 2. - 0	0
	28. 2. - 5,8	5,8
	28. 2. - 11,9	11,9
C16/20	7. 3. - 0	0
	7. 3. - 4	4
	7. 3. - 8	8
C80/87	11. 3. - 0	0
	11. 3. - 7,5	7,5
	11. 3. - 15	15

## 5.6 Zkoušky čerstvého betonu

### 5.6.1 Stanovení konzistence betonové směsi – zkouška sednutím

Tato zkouška je vhodná pro beton s maximální velikostí zrna kameniva 40 mm. Provádí se podle normy ČSN EN 12350-2 [15]. Ke zkoušce je zapotřebí podkladní deska, forma, propichovací tyč, násypka. Nejprve se forma s podkladní deskou navlhčí, poté se forma umístí na střed podložky, kde se pevně přišlápne. Nádoba se plní ve třech vrstvách, každá vždy do třetiny výšky zkušební nádoby a každá vrstva se zhutní 25 vpichy propichovací tyčí tak, aby vpichy mírně zasahovali i do předchozí vrstvy. Z formy se odstraní násypka a přebytečný beton, případně se forma betonem doplní, pokud betonová směs nedosáhla až k hornímu okraji formy. Z podkladní desky se odstraní spadlý beton. Forma se opatrně zvedne během 5 – 15 sekund. Ihned po zvednutí formy se pomocí svinovacího metru změří sednutí (obr. 19). Pokud je kužel betonové směsi neporušený a symetrický, je zkouška platná. Jestliže dojde k usmýknutí vzorku, je nutné zkoušku opakovat. Výsledkem zkoušky je zaznamenaná hodnota sednutí  $h$  (S) zaokrouhlená na nejbližších 10 mm a následná klasifikace dle (tab. 9) [15].



Obr. 19: Zkušební forma a betonová směs po provedení zkoušky sednutím



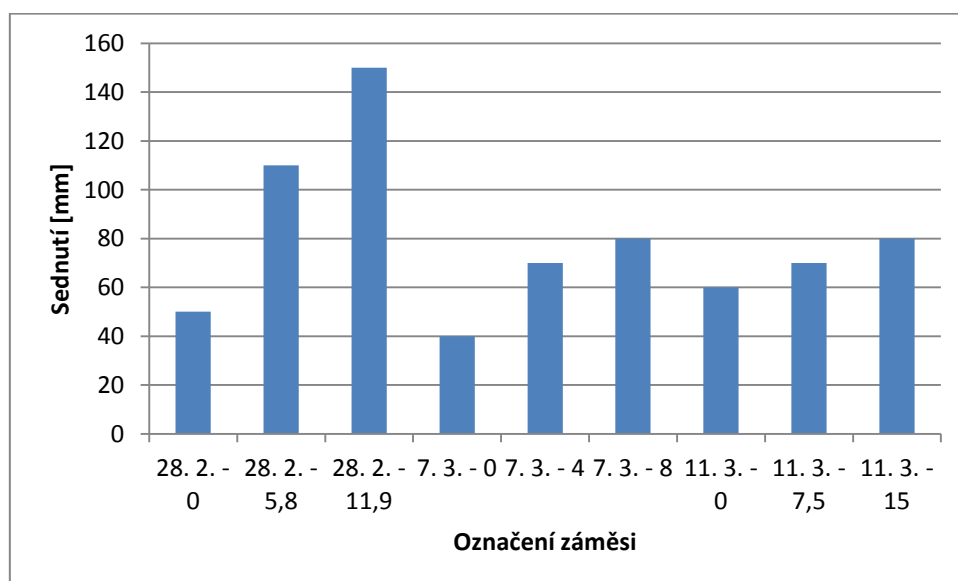
Tab. 9: Klasifikace podle sednutí kužele; S (Slump test) [1]

stupeň	sednutí [mm]
S1 - směs tuhá	10-40
S2 - směs plastická	50-90
S3 - směs měkká	100-150
S4 - směs velmi měkká	160-210
S5 - směs tekutá	nad 220

Bylo provedeno stanovení konzistence všech připravených záměsí. Jejich hodnoty jsou uvedeny v (tab. 10) a graficky znázorněny (obr. 20).

tab. 10: Stanovení konzistence čerstvého betonu sednutím kužele

záměs	označení záměsí	sednutí h(S) [mm]	konzistence
1	28. 2. - 0	50	S2 - směs plastická
2	28. 2. - 5,8	110	S3 - směs měkká
3	28. 2. - 11,9	150	S3 - směs měkká
4	7. 3. - 0	40	S1 - směs tuhá
5	7. 3. - 4	70	S2 - směs plastická
6	7. 3. - 8	80	S2 - směs plastická
7	11. 3. - 0	60	S2 - směs plastická
8	11. 3. - 7,5	70	S2 - směs plastická
9	11. 3. - 15	80	S2 - směs plastická



Obr. 20: Grafické znázornění sednutí jednotlivých záměsí

Z (obr. 20) je patrné, že přidání provzdušňující přísady má vliv na konzistenci betonové směsi. Díky přidání vzduchu se směs stává plastičtější.

### 5.6.2 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé betonové směsi – tlakoměrná metoda

Zkouška se provádí dle normy ČSN EN 12350-7 [16] ve zkušební nádobě (obr. 21), která se ve vrstvách naplní čerstvou betonovou směsí. Tyto vrstvy se zhutní na vibračním stole, nádoba se doplní až po horní okraj, případně se beton přesahující horní okraj nádoby setře pomocí navlhčené houby. Na nádobu se připevní víko. Uzavře se hlavní ventil pro přívod vzduchu a otevřou se boční ventily, kterými se do nádoby pomocí stříčky doplní voda. Když začne voda ventily vytékat, tak se boční ventily uzavřou. Poté se do vzduchové komory napumpuje vzduch, tak aby ručička tlakoměru ukazovala počáteční hodnotu tlaku. Po následné otevření hlavního ventilu se z tlakoměru na zkušební přístroji odečte hodnota, která odpovídá objemu vzduchu v čerstvé betonové směsi v procentech [5].

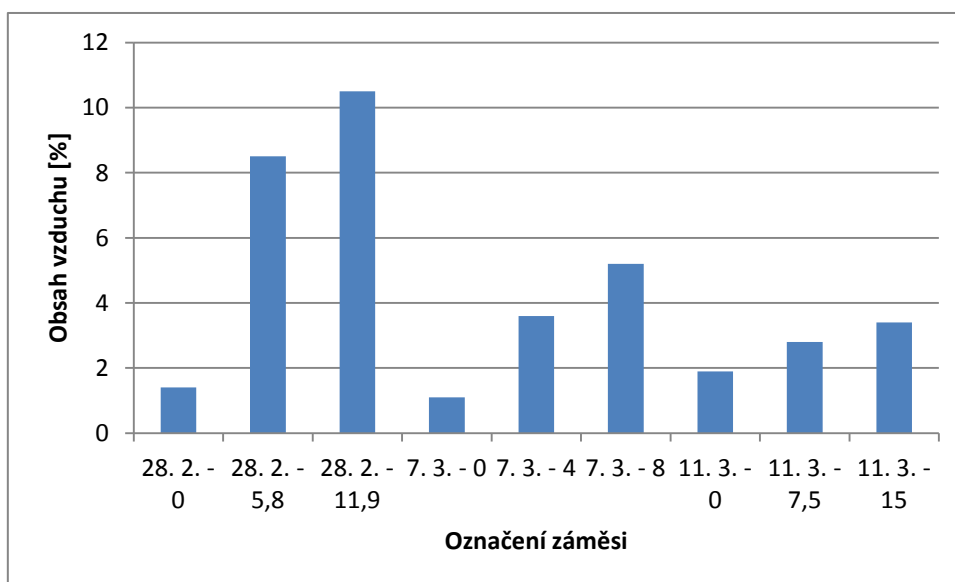


Obr. 21: Zkušební nádoba pro měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Obsah vzduchu jednotlivých záměsí je uveden v tabulce (tab. 11).

Tab. 11: Hodnoty obsahu vzduchu naměřených v jednotlivých záměsích pomocí tlakoměrné metody

záměs	označení záměsi	obsah vzduchu [%]
1	28. 2. - 0	1,4
2	28. 2. - 5,8	8,5
3	28. 2. - 11,9	10,5
4	7. 3. - 0	1,1
5	7. 3. - 4	3,6
6	7. 3. - 8	5,2
7	11. 3. - 0	1,9
8	11. 3. - 7,5	2,8
9	11. 3. - 15	3,4



Obr. 22: Grafické znázornění obsahu vzduchu v jednotlivých záměsích

Z grafického znázornění (obr. 22) obsahu vzduchu v jednotlivých záměsích je patrné, že zvyšující se množství přidané provzdušňující přísady má za následek zvyšující se množství vzduchu v čerstvém betonu, což odpovídá předpokládanému chování materiálu. Také je vidět, že množství vzduchu nezávisí pouze na provzdušnění. U vysokopevnostního betonu je přidáno více provzdušňující přísady a přesto je obsah vzduchu menší. Roli zjevně hraje množství vody, cementu a také typ cementu, které bylo navrženo pro receptury jednotlivých tříd betonu.

### 5.6.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé zhutněné betonové směsi

Zkoušku je možné provést dle normy ČSN EN 12350-7 [17] v tuhé vodotěsné nádobě o známém objemu, jejíž nejmenší rozměr nesmí být menší jak 150 mm. V tomto případě byla zkouška provedena ve válcových formách průměru 150 mm a výšce 300mm (obr. 23), jejichž objem je rovný 0,005301 m<sup>3</sup>. Nejprve se zvážily prázdné formy, které se naplnili čerstvou betonovou směsí, a následně se zhutnily na vibračním stole. Takto naplněné formy se opět zvážily. Z těchto naměřených hodnot je možno vypočítat objemovou hmotnost čerstvé betonové směsi dle vztahu [17]:

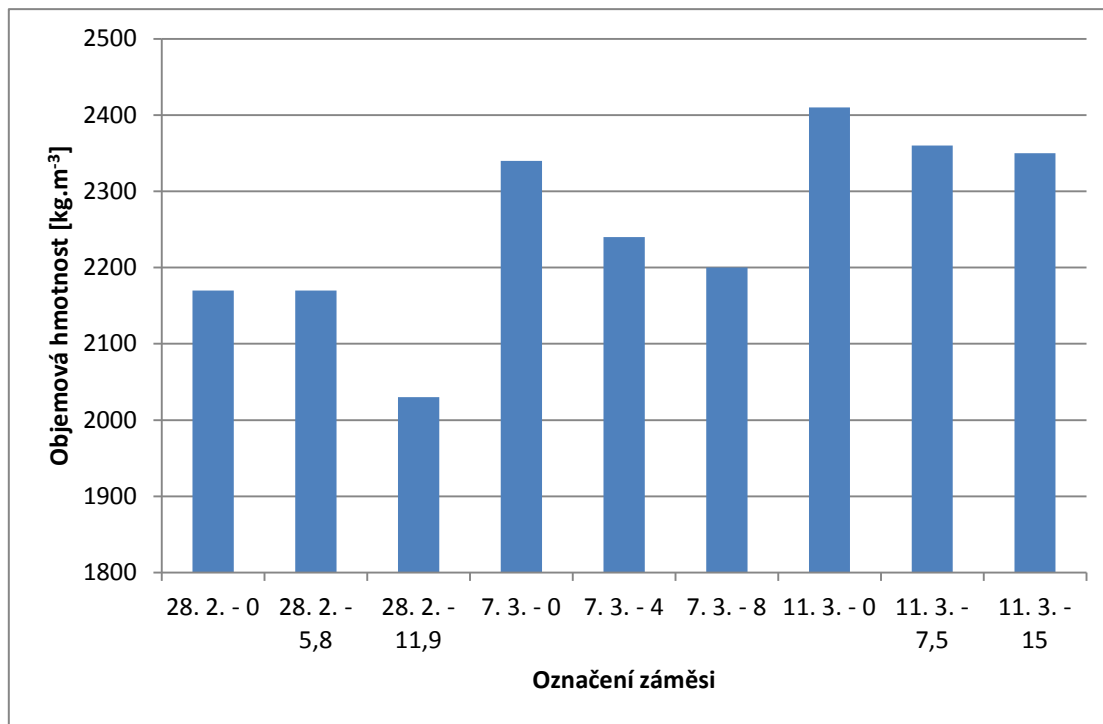
$$\rho_v = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (19.)$$

Výsledné hodnoty objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližší 10 kg . m<sup>-3</sup>. U každé záměsi byly odebrány čtyři vzorky, u kterých byla objemová hmotnost čerstvého betonu určována, a z těchto hodnot poté byla vypočtena průměrná objemová hmotnost pro každou ze záměsí.



Obr. 23: Válnová zkušební forma

Byla stanovena objemová hmotnost všech záměsí. Všechny výsledné hodnoty byly zpracovány do grafu (obr. 24) a zaznamenány do (tab. 12).



Obr. 24: Znázornění objemové hmotnosti jednotlivých záměsí

Na (obr. 24) je vidět, jak zvyšující se obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi snižuje její objemovou hmotnost. Se snižující se třídou betonu je zřejmý výraznější rozdíl mezi jednotlivými směsmi.

Tab. 12: Objemová hmotnost čerstvého betonu

záměs	označení záměsi	těleso	hmotnost prázdného válce - $m_1$ [kg]:	hmotnost válce naplněného čerstvým betonem - $m_2$ [kg]	objemová hmotnost čerstvého betonu - $\rho_v$ [kg . m <sup>-3</sup> ]	průměrná objemová hmotnost čerstvého betonu - $\rho_v$ [kg . m <sup>-3</sup> ]
1	28. 2. - 0	Válec č. 1	1,55	13,40	2240	2170
		Válec č. 2	1,55	13,05	2170	
		Válec č. 3	1,65	13,05	2150	
		Válec č. 4	1,70	12,95	2120	
2	28. 2. - 5,8	Válec č. 1	1,30	13,10	2230	2170
		Válec č. 2	1,60	13,00	2150	
		Válec č. 3	1,70	13,00	2130	
		Válec č. 4	1,70	13,10	2150	
3	28. 2. - 11,9	Válec č. 1	1,35	12,20	2050	2030
		Válec č. 2	1,25	12,20	2070	
		Válec č. 3	1,40	11,95	1990	
		Válec č. 4	1,50	12,05	1990	
4	7. 3. - 0	Válec č. 1	1,70	14,20	2360	2340
		Válec č. 2	1,65	14,00	2330	
		Válec č. 3	1,70	14,10	2340	
		Válec č. 4	1,60	13,90	2320	
5	7. 3. - 4	Válec č. 1	1,65	13,45	2230	2240
		Válec č. 2	1,60	13,35	2220	
		Válec č. 3	10,00	22,05	2270	
		Válec č. 4	1,80	13,65	2240	
6	7. 3. - 8	Válec č. 1	1,80	13,35	2180	2200
		Válec č. 2	1,60	13,25	2200	
		Válec č. 3	1,75	13,35	2190	
		Válec č. 4	1,70	13,40	2210	
7	11. 3. - 0	Válec č. 1	1,65	14,35	2400	2410
		Válec č. 2	1,60	14,40	2410	
		Válec č. 3	1,70	14,55	2420	
		Válec č. 4	1,70	14,50	2410	
8	11. 3. - 7,5	Válec č. 1	1,80	14,30	2360	2360
		Válec č. 2	1,60	14,10	2360	
		Válec č. 3	1,70	14,30	2380	
		Válec č. 4	1,80	14,20	2340	
9	11. 3. - 15	Válec č. 1	1,60	14,15	2370	2350
		Válec č. 2	1,65	14,15	2360	
		Válec č. 3	1,65	14,10	2350	
		Válec č. 4	1,60	13,90	2320	



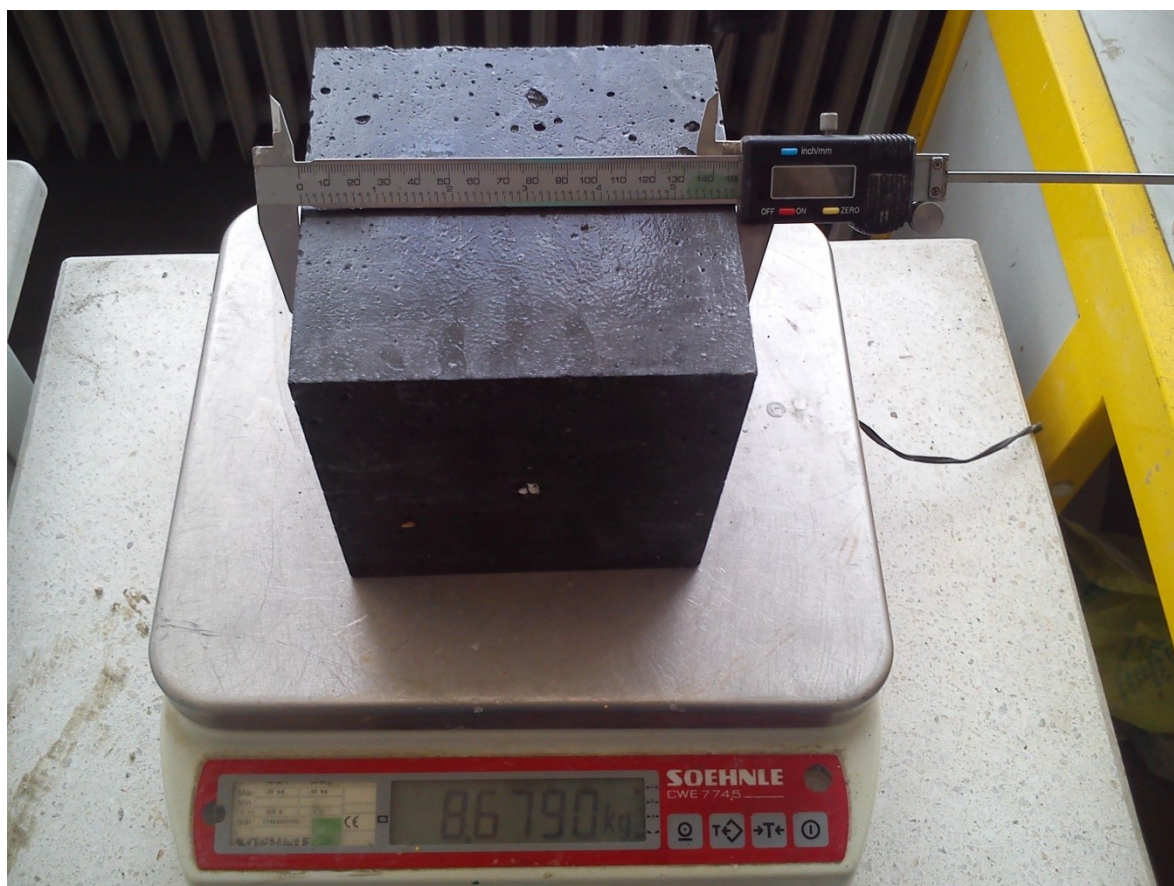
## 5.7 Zkoušení ztvrdlého betonu

### 5.7.1 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky

Objemová hmotnost byla gravimetricky určena na všech vodou nasycených tělesech. Nejprve je nutné stanovit objem zkušebních vzorků. Objem se vypočítá ze skutečně změřených rozměrů vzorků pomocí známých vztahů pro výpočet objemu těles. Poté se tělesa zváží a objemová hmotnost se spočte užitím vzorce [18]:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (20.)$$

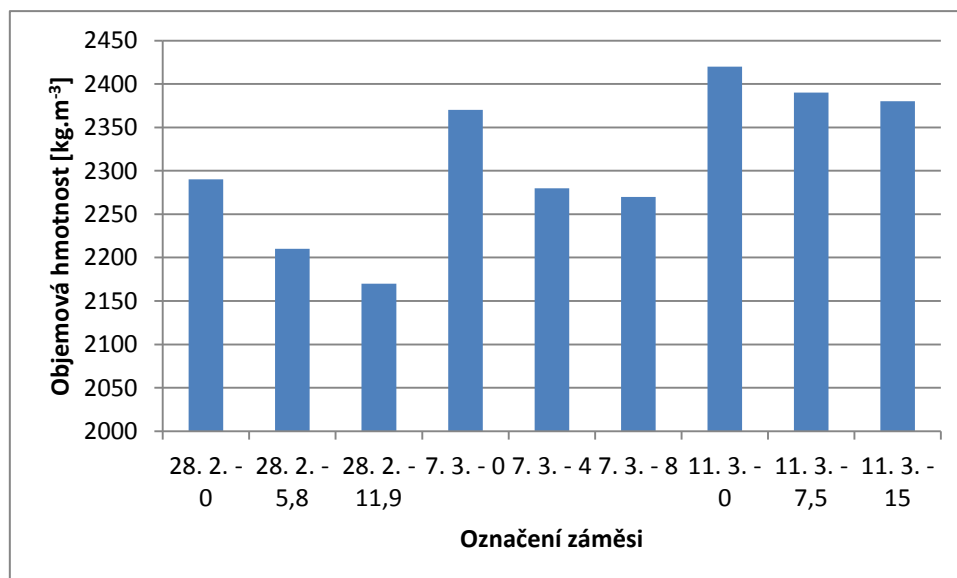
U každé záměsi byly u všech zkušebních těles zjištěny jejich rozměry a následně byly zváženy. Z těchto hodnot byla vypočtena objemová hmotnost každého vzorku. Z těchto hodnot byla poté vypočtena průměrná objemová hmotnost pro každou ze záměsí.



Obr. 25: Stanovení rozměrů zkušebního tělesa pomocí posuvného měřítka

Tab. 13 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky

záměs	označení záměsi	objemová hmotnost [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
1	28. 2. - 0	2290
2	28. 2. - 5,8	2210
3	28. 2. - 11,9	2170
4	7. 3. - 0	2370
5	7. 3. - 4	2280
6	7. 3. - 8	2270
7	11. 3. - 0	2420
8	11. 3. - 7,5	2390
9	11. 3. - 15	2380



Obr. 26: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých záměsí určené gravimetricky

### 5.7.2 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

Objemová hmotnost tělesa je hmotnost jednotkového objemu vzorku včetně všech dutin a pórů, které těleso obsahuje. Zkouška se provádí podle ČSN EN 12390-7 [18]. K určení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením nejprve zvážíme tělesa nasycená vodou na hydroskopických vahách ve vodě. Vzorek se umístí na pomocnou konstrukci takovým způsobem, aby byl zcela ponořen pod vodou a nedotýkal se stěn nádoby, do které byl ponořen. Poté se odečte hmotnost tělesa ponořeného pod vodou  $m_{nw}$ . Po vytažení z vody se tělesa otřela vlhkou tkaninou a zvážily se. Tím se určila hmotnost nasycených vzorků na



vzduchu  $m_n$ . Pak se tělesa nechala vysušit v sušárně, než dosáhly ustálené hmotnosti. Takto vysušené vzorky se opět zvážily a zaznamenala se jejich hmotnost  $m_s$ . Objemová hmotnost se vypočte pomocí vztahu [18]:

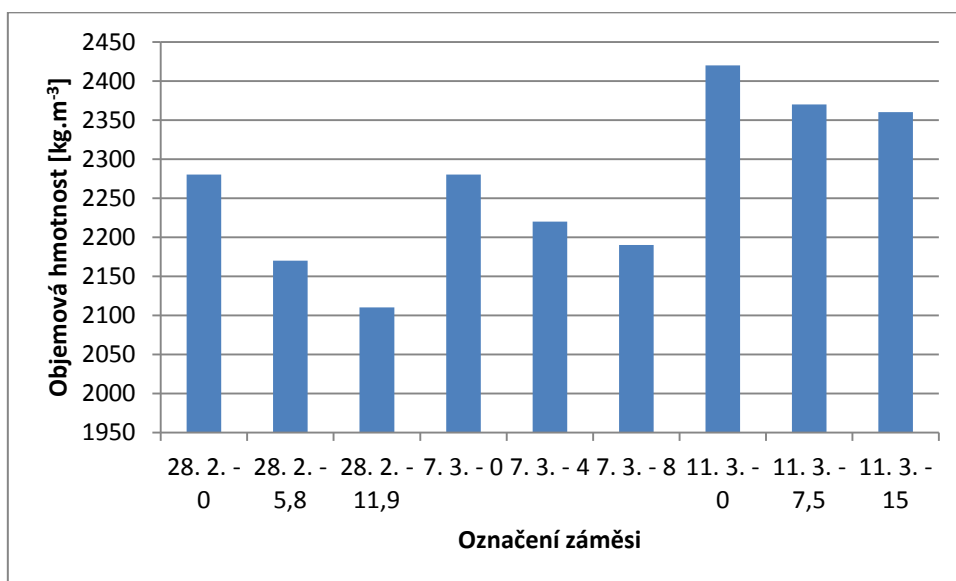
$$OH = \frac{m_s}{(m_n - m_{nw})} \cdot \rho_w \quad (21.)$$

Tato zkouška byla provedena na vybraných vzorcích krychlových vzorků o rozměrech 100 x 100 mm z každé záměsi. Naměřené hodnoty hmotností a z nich určené objemové hmotnosti jsou uvedeny v (tab. 14).

Tab. 14 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost nasyceného vzorku $m_n$ [kg]	hmotnost vzorku váženého ve vodě $m_{nw}$ [kg]	objemová hmotnost OH [kg.m <sup>-3</sup> ]	průměrná objemová hmotnost OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
1	28. 2. - 0	6c	2,2290	2,2910	1,3083	2270	2280
		7a	2,2550	2,3180	1,3324	2290	
		7b	2,2390	2,3075	1,3235	2280	
		7c	2,2580	2,3305	1,3436	2290	
2	28. 2. - 5,8	6c	2,1070	2,1865	1,2099	2160	2170
		7a	2,1480	2,2120	1,2272	2180	
		7b	2,1630	2,2355	1,2367	2170	
		7c	2,1830	2,2675	1,2513	2150	
3	28. 2. - 11,9	6c	2,0880	2,1805	1,1794	2090	2110
		7a	2,0640	2,1395	1,1694	2130	
		7b	2,0850	2,1705	1,1765	2100	
		7c	2,0590	2,1470	1,1725	2110	
4	7. 3. - 0	5a	2,3015	2,4271	1,4061	2250	2280
		5b	2,2811	2,3886	1,3926	2290	
		5c	2,2625	2,3664	1,3755	2280	
		6a	2,2688	2,3863	1,3839	2260	
		6b	2,3096	2,4176	1,4035	2280	
		6c	2,2866	2,3927	1,3924	2290	
5	7. 3. - 4	5a	2,1935	2,3105	1,3171	2210	2220
		5b	2,1974	2,3024	1,3101	2210	
		5c	2,2106	2,3138	1,3210	2230	
		6a	2,1712	2,2521	1,2840	2240	
		6b	2,1741	2,2697	1,2894	2220	
		6c	2,1528	2,2672	1,2865	2200	

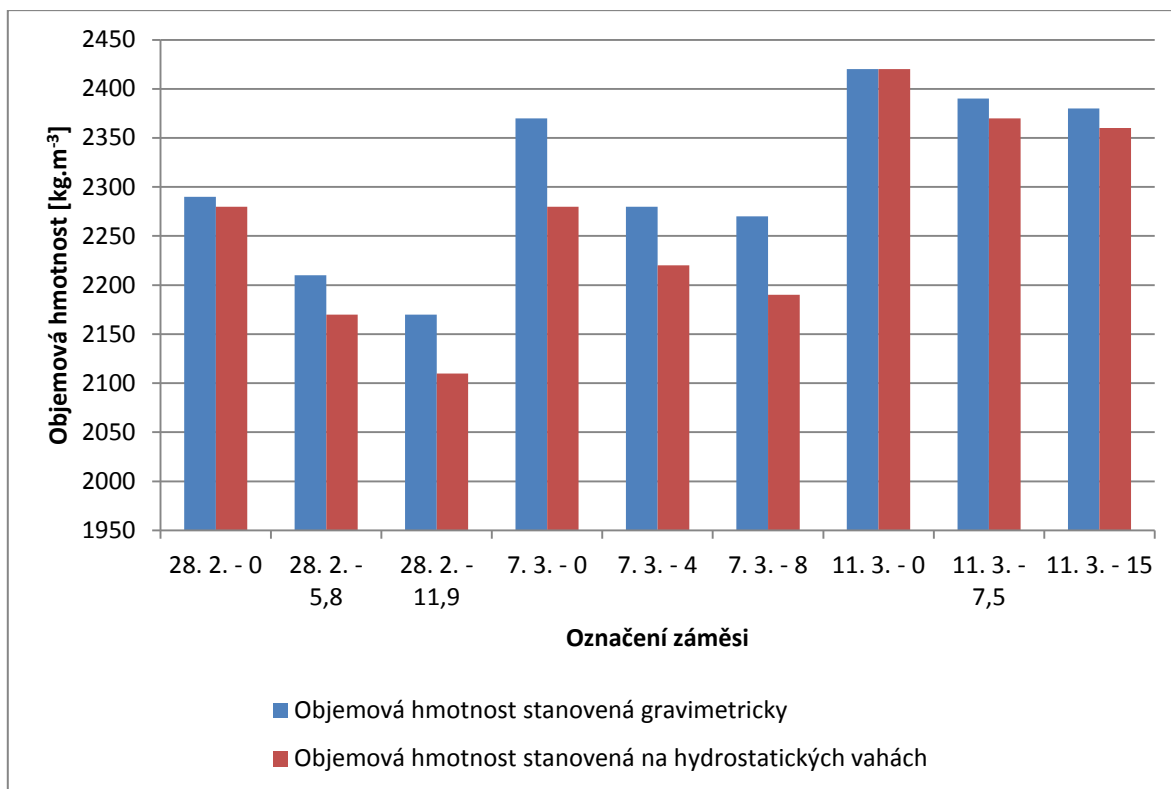
záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost nasyceného vzorku $m_n$ [kg]	hmotnost vzorku váženého ve vodě $m_{nw}$ [kg]	objemová hmotnost OH [kg.m <sup>-3</sup> ]	průměrná objemová hmotnost OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
6	7. 3. - 8	5a	2,1627	2,2782	1,2834	2170	2190
		5b	2,1369	2,2436	1,2762	2210	
		5c	2,1446	2,2437	1,2692	2200	
		6a	2,1329	2,2513	1,2723	2180	
		6b	2,2413	2,3505	1,3239	2180	
		6c	2,1605	2,2662	1,2847	2200	
7	11. 3. - 0	5a	2,4129	2,4507	1,4568	2430	2420
		5b	2,4211	2,4653	1,4672	2430	
		5c	2,3511	2,4034	1,4236	2400	
		6a	2,4066	2,4503	1,4542	2420	
		6b	2,4796	2,5252	1,5007	2420	
		6c	2,4571	2,5097	1,4941	2420	
8	11. 3. - 7,5	5a	2,3649	2,4009	1,4063	2380	2370
		5b	2,3797	2,4189	1,4134	2370	
		5c	2,4013	2,4400	1,4296	2380	
		6a	2,3640	2,4011	1,4028	2370	
		6b	2,3935	2,4336	1,4222	2370	
		6c	2,3229	2,4105	1,4072	2320	
9	11. 3. - 15	5a	2,3567	2,4003	1,4036	2360	2360
		5b	2,3619	2,4077	1,4044	2350	
		5c	2,3592	2,4166	1,4111	2350	
		6a	2,4157	2,4568	1,4384	2370	
		6b	2,4226	2,4688	1,4468	2370	
		6c	2,4001	2,4561	1,4401	2360	



Obr. 27: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých záměsí určené hydrostatickým vážením



Obr. 28: Zkušební těleso vážené pod vodou na hydrostatických vahách



Obr. 29: Srovnání objemových hmotností určených gravimetricky a vážením na hydrostatických vahách

Mezi objemovými hmotnostmi stanovenými gravimetricky a objemovými hmotnostmi stanovenými pomocí hydrostatických vah (obr. 29) lze pozorovat, že se jejich hodnoty mírně liší. To je zřejmě způsobeno tím, že tělesa nemají dokonale pravidelný tvar a tudíž není možné přesně spočítat jejich objem z naměřených rozměrů jejich stran.

### 5.7.3 Stanovení zdánlivé pórovitosti

Vlastní zkouška probíhá obdobně jako stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením, proto se tyto zkoušky provádějí společně. Nejdříve je nutno vzorky nasycené vodou zvážit na hydrostatické váze ponořené do vody, tím získáme hmotnost  $m_{nw}$ , poté se zkušební tělesa povrchově otřou a zváží se na vzduchu, zaznamená se jejich hmotnost  $m_n$ . Dále se vzorky nechají vysušit v sušárně až do dosažení ustálené hmotnosti a opět se určí jejich hmotnost  $m_s$ . Zdánlivá pórovitost se poté vypočítá vztahem:

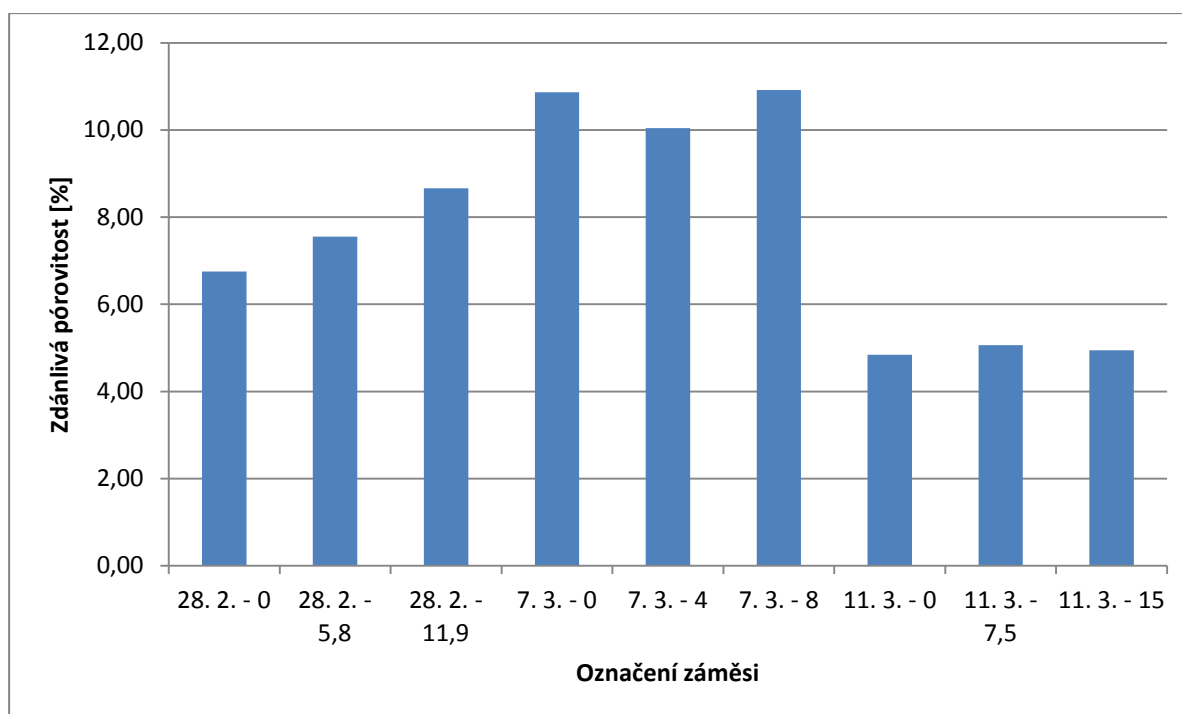
$$PZ = \frac{m_n - m_s}{(m_n - m_{nw})} \cdot 100 \quad (22.)$$

Zdánlivá pórovitost byla opět určena na vybraných zkušebních tělesech tvaru krychle o rozměrech 100 x 100 mm od každé připravené záměsi. Jednotlivé naměřené hmotnosti a vypočítaná zdánlivá pórovitost je uvedena v (tab. 15). Dále byla pro každou záměs určena průměrná hodnota zdánlivé pórovitosti [19].

Tab. 15: Stanovení zdánlivé pórovitosti

záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost nasyceného vodou $m_n$ [kg]	hmotnost vzorku váženého ve vodě $m_{nw}$ [kg]	zdánlivá pórovitost PZ [%]	průměrná zdánlivá pórovitost PZ [%]
1	28. 2. - 0	6c	2,2290	2,2910	1,3083	6,31	6,75
		7a	2,2550	2,3180	1,3324	6,39	
		7b	2,2390	2,3075	1,3235	6,96	
		7c	2,2580	2,3305	1,3436	7,35	
2	28. 2. - 5,8	6c	2,1070	2,1865	1,2099	8,14	7,55
		7a	2,1480	2,2120	1,2272	6,50	
		7b	2,1630	2,2355	1,2367	7,26	
		7c	2,1830	2,2675	1,2513	8,32	
3	28. 2. - 11,9	6c	2,0880	2,1805	1,1794	9,24	8,66
		7a	2,0640	2,1395	1,1694	7,78	
		7b	2,0850	2,1705	1,1765	8,60	
		7c	2,0590	2,1470	1,1725	9,03	
4	7. 3. - 0	5a	2,3015	2,4271	1,4061	12,30	11,09
		5b	2,2811	2,3886	1,3926	10,79	
		5c	2,2625	2,3664	1,3755	10,49	
		6a	2,2688	2,3863	1,3839	11,72	
		6b	2,3096	2,4176	1,4035	10,65	
		6c	2,2866	2,3927	1,3924	10,61	

záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost vzorku nasyceného vodou $m_n$ [kg]	hmotnost vzorku váženého ve vodě $m_{nw}$ [kg]	zdánlivá pórovitost PZ [%]	průměrná zdánlivá pórovitost PZ [%]
5	7. 3. - 4	5a	2,1935	2,3105	1,3171	11,78	10,42
		5b	2,1974	2,3024	1,3101	10,58	
		5c	2,2106	2,3138	1,3210	10,39	
		6a	2,1712	2,2521	1,2840	8,36	
		6b	2,1741	2,2697	1,2894	9,75	
		6c	2,1528	2,2672	1,2865	11,67	
6	7. 3. - 8	5a	2,1627	2,2782	1,2834	11,61	11,05
		5b	2,1369	2,2436	1,2762	11,03	
		5c	2,1446	2,2437	1,2692	10,17	
		6a	2,1329	2,2513	1,2723	12,09	
		6b	2,2413	2,3505	1,3239	10,64	
		6c	2,1605	2,2662	1,2847	10,77	
7	11. 3. - 0	5a	2,4129	2,4507	1,4568	3,80	4,60
		5b	2,4211	2,4653	1,4672	4,43	
		5c	2,3511	2,4034	1,4236	5,34	
		6a	2,4066	2,4503	1,4542	4,39	
		6b	2,4796	2,5252	1,5007	4,45	
		6c	2,4571	2,5097	1,4941	5,18	
8	11. 3. - 7,5	5a	2,3649	2,4009	1,4063	3,62	4,63
		5b	2,3797	2,4189	1,4134	3,90	
		5c	2,4013	2,4400	1,4296	3,83	
		6a	2,3640	2,4011	1,4028	3,72	
		6b	2,3935	2,4336	1,4222	3,96	
		6c	2,3229	2,4105	1,4072	8,73	
9	11. 3. - 15	5a	2,3567	2,4003	1,4036	4,37	4,79
		5b	2,3619	2,4077	1,4044	4,56	
		5c	2,3592	2,4166	1,4111	5,71	
		6a	2,4157	2,4568	1,4384	4,04	
		6b	2,4226	2,4688	1,4468	4,52	
		6c	2,4001	2,4561	1,4401	5,51	



Obr. 30: Zdánlivá pórovitost jednotlivých záměsí

Bylo předpokládáno, že s přidáním většího množství provzdušňující přísady se bude pórovitost zvyšovat. Z (obr. 30) je patrné, že tento předpoklad nebyl u všech záměsí splněn. Zdánlivá pórovitost zohledňuje pouze otevřené póry na povrchu zkoušeného tělesa, tudíž nic nevypovídá o pórech uvnitř tělesa. Nižší zdánlivé pórovitosti u záměsí připravených s přidáním většího množství provzdušňovadla mohla být dosaženo například lepším zhutněním do formy, lepším rozložením kameniva a mnoha dalšími faktory.

#### 5.7.4 Stanovení zdánlivé hustoty

Zkouška se provádí společně se stanovením zdánlivé pórovitosti stejným způsobem, liší se pouze výpočtem. Zdánlivou hustotu je možné spočítat vztahem [19]:

$$ZH = \frac{m_s}{(m_s - m_{nw})} \cdot \rho_w \quad (23.)$$

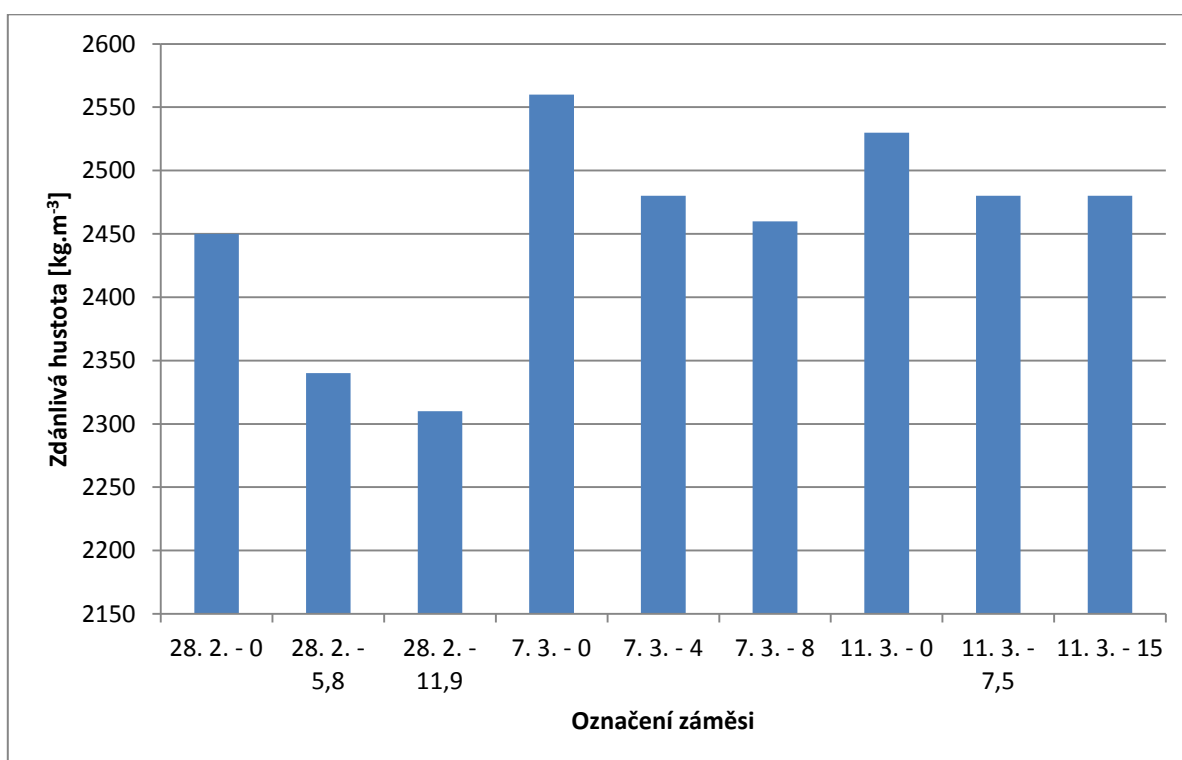
Určení zdánlivé hustoty bylo provedeno na stejných vzorcích, na kterých byla určena i zdánlivá pórovitost. Vypočtené hodnoty zdánlivé hustoty a aritmetický průměr pro jednotlivé záměsi je uveden v (tab. 16).

Tab. 16: Stanovení zdánlivé hustoty

záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost vzorku váženého ve vodě $m_{nw}$ [kg]	zdánlivá hustota ZH [kg.m <sup>-3</sup> ]	průměrná zdánlivá hustota ZH [kg.m <sup>-3</sup> ]
1	28. 2. - 0	6c	2,2290	1,3083	2420	2450
		7a	2,2550	1,3324	2440	
		7b	2,2390	1,3235	2450	
		7c	2,2580	1,3436	2470	
2	28. 2. - 5,8	6c	2,1070	1,2099	2350	2340
		7a	2,1480	1,2272	2330	
		7b	2,1630	1,2367	2340	
		7c	2,1830	1,2513	2340	
3	28. 2. - 11,9	6c	2,0880	1,1794	2300	2310
		7a	2,0640	1,1694	2310	
		7b	2,0850	1,1765	2290	
		7c	2,0590	1,1725	2320	
4	7. 3. - 0	5a	2,3015	1,4061	2570	2560
		5b	2,2811	1,3926	2570	
		5c	2,2625	1,3755	2550	
		6a	2,2688	1,3839	2560	
		6b	2,3096	1,4035	2550	
		6c	2,2866	1,3924	2560	

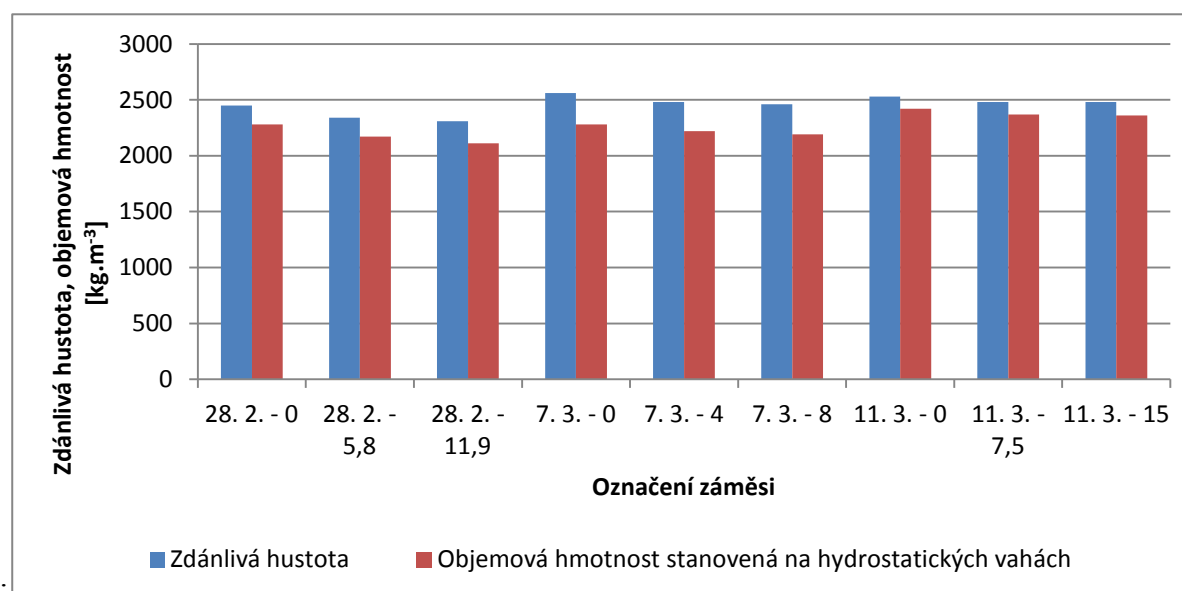


záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost vzorku váženého ve vodě $m_{nw}$ [kg]	zdánlivá hustota ZH [kg.m <sup>-3</sup> ]	průměrná zdánlivá hustota ZH [kg.m <sup>-3</sup> ]
5	7. 3. - 4	5a	2,1935	1,3171	2500	2480
		5b	2,1974	1,3101	2480	
		5c	2,2106	1,3210	2480	
		6a	2,1712	1,2840	2450	
		6b	2,1741	1,2894	2460	
		6c	2,1528	1,2865	2490	
6	7. 3. - 8	5a	2,1627	1,2834	2460	2460
		5b	2,1369	1,2762	2480	
		5c	2,1446	1,2692	2450	
		6a	2,1329	1,2723	2480	
		6b	2,2413	1,3239	2440	
		6c	2,1605	1,2847	2470	
7	11. 3. - 0	5a	2,4129	1,4568	2520	2530
		5b	2,4211	1,4672	2540	
		5c	2,3511	1,4236	2530	
		6a	2,4066	1,4542	2530	
		6b	2,4796	1,5007	2530	
		6c	2,4571	1,4941	2550	
8	11. 3. - 7,5	5a	2,3649	1,4063	2470	2480
		5b	2,3797	1,4134	2460	
		5c	2,4013	1,4296	2470	
		6a	2,3640	1,4028	2460	
		6b	2,3935	1,4222	2460	
		6c	2,3229	1,4072	2540	
9	11. 3. - 15	5a	2,3567	1,4036	2470	2480
		5b	2,3619	1,4044	2470	
		5c	2,3592	1,4111	2490	
		6a	2,4157	1,4384	2470	
		6b	2,4226	1,4468	2480	
		6c	2,4001	1,4401	2500	



Obr. 31: Zdánlivá hustota jednotlivých záměsí

Z (Obr. 31) je patrné, že nejvyšší zdánlivé hustoty dosahují vzorky připravené z receptury bez přidání provzdušňující přísady. U vzorků s vyšším obsahem provzdušňovačla je naopak jejich zdánlivá hustota nižší.



Obr. 32: Srovnání zdánlivé hustoty a objemové hmotnosti

### 5.7.5 Stanovení nasákavosti

Nasákavost udává poměr hmotnosti vody, kterou může vzorek přijmout za stanovených fyzikálních podmínek, k hmotnosti vysušeného vzorku. Vyjadřuje se v procentech hmotnosti [9]. Stanovení nasákavosti (NV) se provede nejprve zvážení nasáklých vzorků – hmotnost  $m_n$ , poté se vzorky nechají vysušit v sušárně, než dojde k ustálení jejich hmotnosti. U takto vysušených vzorků se určí jejich hmotnost  $m_s$ . Nasákavost se následně vypočte pomocí vztahu:

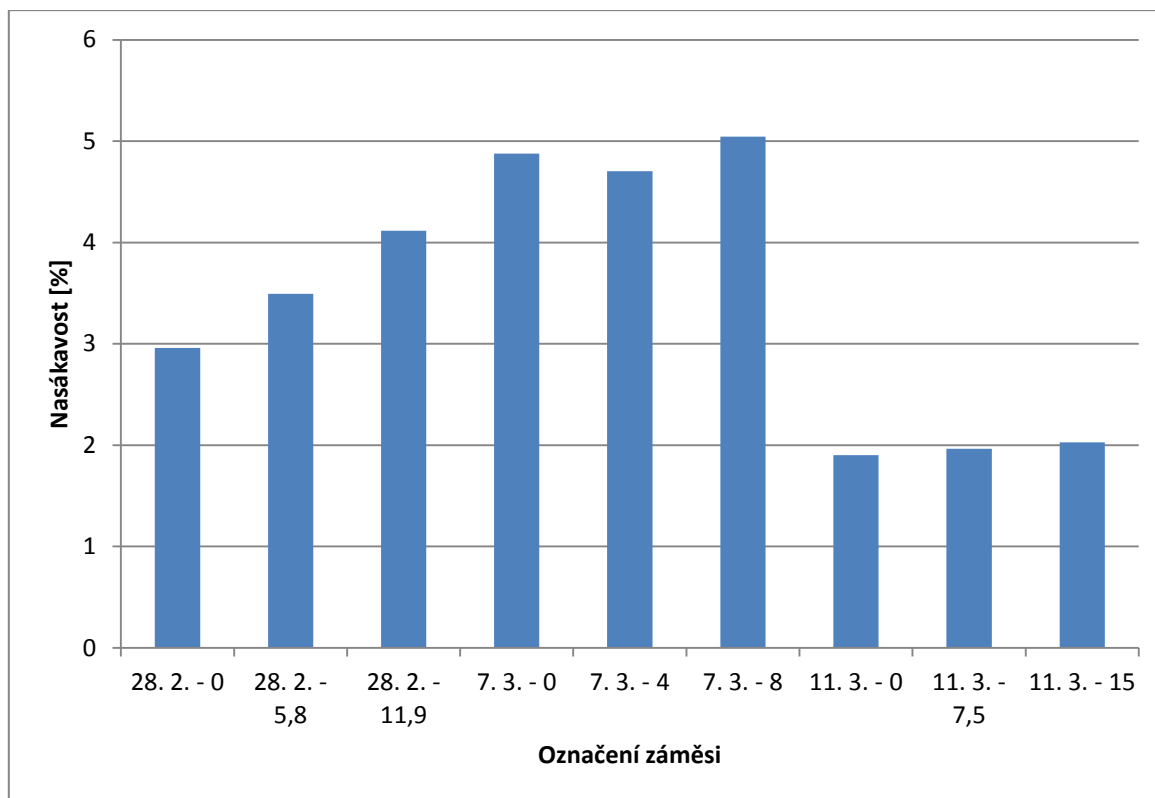
$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (24.)$$

Nasákavost byla určena pouze na vybraných vzorcích od každé záměsi, její hodnoty a následně vypočtený aritmetický průměr nasákavosti pro každou záměs jsou uvedeny v (tab. 17).

Tab. 17: Stanovení nasákavosti vzorků

záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost vzorku nasyceného vodou $m_n$ [kg]	nasákavost NV [%]	průměrná nasákavost NV [%]
1	28. 2. - 0	6c	2,2290	2,2910	2,78	2,96
		7a	2,2550	2,3180	2,79	
		7b	2,2390	2,3075	3,06	
		7c	2,2580	2,3305	3,21	
2	28. 2. - 5,8	6c	2,1070	2,1865	3,77	3,49
		7a	2,1480	2,2120	2,98	
		7b	2,1630	2,2355	3,35	
		7c	2,1830	2,2675	3,87	
3	28. 2. - 11,9	6c	2,0880	2,1805	4,43	4,12
		7a	2,0640	2,1395	3,66	
		7b	2,0850	2,1705	4,10	
		7c	2,0590	2,1470	4,27	
4	7. 3. - 0	5a	2,3015	2,4271	5,46	4,88
		5b	2,2811	2,3886	4,71	
		5c	2,2625	2,3664	4,59	
		6a	2,2688	2,3863	5,18	
		6b	2,3096	2,4176	4,68	
		6c	2,2866	2,3927	4,64	

záměs	označení záměsi	vzorek	hmotnost vysušeného vzorku $m_s$ [kg]	hmotnost vzorku nasyceného vodou $m_n$ [kg]	nasákavost NV [%]	průměrná nasákavost NV [%]
5	7. 3. - 4	5a	2,1935	2,3105	5,33	4,70
		5b	2,1974	2,3024	4,78	
		5c	2,2106	2,3138	4,67	
		6a	2,1712	2,2521	3,73	
		6b	2,1741	2,2697	4,40	
		6c	2,1528	2,2672	5,31	
6	7. 3. - 8	5a	2,1627	2,2782	5,34	5,05
		5b	2,1369	2,2436	4,99	
		5c	2,1446	2,2437	4,62	
		6a	2,1329	2,2513	5,55	
		6b	2,2413	2,3505	4,87	
		6c	2,1605	2,2662	4,89	
7	11. 3. - 0	5a	2,4129	2,4507	1,57	1,90
		5b	2,4211	2,4653	1,83	
		5c	2,3511	2,4034	2,22	
		6a	2,4066	2,4503	1,82	
		6b	2,4796	2,5252	1,84	
		6c	2,4571	2,5097	2,14	
8	11. 3. - 7,5	5a	2,3649	2,4009	1,52	1,97
		5b	2,3797	2,4189	1,65	
		5c	2,4013	2,4400	1,61	
		6a	2,3640	2,4011	1,57	
		6b	2,3935	2,4336	1,68	
		6c	2,3229	2,4105	3,77	
9	11. 3. - 15	5a	2,3567	2,4003	1,85	2,03
		5b	2,3619	2,4077	1,94	
		5c	2,3592	2,4166	2,43	
		6a	2,4157	2,4568	1,70	
		6b	2,4226	2,4688	1,91	
		6c	2,4001	2,4561	2,33	



Obr. 33: Nasákavost jednotlivých záměsí

Na obrázku (Obr. 33) je možné pozorovat, že nejvyšší nasákavosti dosahují vzorky připravené podle receptury pro beton C 16/20. Naopak nejnižší nasákavosti dosahují vzorky připravené podle receptury pro beton C 80/95. Dále je patrné, že ne u všech záměsí se nasákavost zvyšuje s přidáním provzdušňující přísady. U vzorků zhotovených ze záměsí s označením 7. 3. – 4 je dosaženo nižší nasákavosti než u vzorků bez provzdušňovadla. Toto může být zapříčiněno nižším obsahem otevřených pórů, díky kterým se do vzorku nedostane takové množství vody. Obsahu nižšího množství pórů u této záměsí odpovídá i její nižší zdánlivá pórovitost (Obr. 30).

### 5.7.6 Stanovení pevnosti v tlaku

Stanovení tlakové pevnosti bylo provedeno na všech vzorcích ze všech připravených záměsí. Polovina vzorků od každé záměsi byla ponechána až do doby zkoušky ve vodě a druhá polovina byla den dopředu z vodní lázně vytažena a vysušena v sušárně. Tímto způsobem byl sledován vliv nasycení vodou na tlakovou pevnost betonu. Výsledné hodnoty pevností nasycených a vysušených vzorků u každé záměsi byly zpracovány do grafů (obr. 35, 36) a porovnány. Dále byl u každé připravené receptury betonu sledován vliv pórovitosti na tlakovou pevnost.

Zkouška probíhá na zkušebním lisu. Před vložením vzorku do lisu se změřily jeho rozměry. Poté se vzorek umístil do zkušebního zařízení tak, aby lis tlačil na vzorek kolmo na směr jeho plnění. Na zkušebním lisu se nastavila vhodná rychlost zatěžování. Spustil se zatěžovací proces, který probíhal do doby, než došlo k porušení vzorku (Obr. 34). Zaznamenala se síla ( $F$ ) vyvozená lisem, při které došlo k porušení vzorku. Dále se z naměřených rozměrů zkušebních vzorků vypočte zatěžovací plocha ( $A$ ). Z těchto hodnot je možné vypočítat tlakovou pevnost vzorků vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (25.)$$

Naměřené hodnoty sil, při kterých došlo k porušení vzorků, vypočtená pevnost v tlaku a průměrná pevnost v tlaku jednotlivých záměsí pro vodou nasycené a vysušené krychlové vzorky o rozměrech 100 x 100 mm a vodou nasycené nebo vysušené válcové vzorky průměru 150 mm a výšce 300 mm je uvedena v (tab. 18, 19). Dále pro vzorky nasycené vodou byla orientačně stanovena jejich vlhkost na odebraných vzorcích z porušených těles, které byly zváženy, poté vysušeny v sušárně a opět zváženy. Výsledná průměrná vlhkost jednotlivých záměsí je uvedena v (tab. 20). Pevnosti byly zkoušeny po 28 dnech.



Obr. 34: Porušení zkušebních vzorků ve zkušebním lisu

Tab. 18: Stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech krychlových vzorků 100 x 100 mm

vzorky krychle 100 x 100								
označení záměsi	vzorek	rozměry [mm]		Stav	plocha [m <sup>2</sup> ]	síla [kN]	pevnost vzorku v tlaku [MPa]	průměrná pevnost vzorku v tlaku [MPa]
		b	c					
28. 2. - 0	5a	100,47	100,59	nasycený vodou	0,010106	499,1	49,39	47,94
	5b	100,83	100,14	nasycený vodou	0,010097	495,0	49,02	
	5c	100,61	99,24	nasycený vodou	0,009985	457,5	45,82	
	6a	100,35	100,69	nasycený vodou	0,010104	484,1	47,91	
	6b	100,97	101,60	nasycený vodou	0,010259	488,0	47,57	
	6c	100,73	99,62	vysušený	0,010035	511,9	51,01	50,12
	7a	100,22	99,84	vysušený	0,010006	509,3	50,90	
	7b	100,06	100,10	vysušený	0,010016	502,5	50,17	
	7c	100,52	100,59	vysušený	0,010111	489,3	48,39	
28. 2. - 5,8	5a	102,56	98,42	nasycený vodou	0,010094	307,5	30,46	31,57
	5b	103,07	98,27	nasycený vodou	0,010129	315,9	31,19	
	5c	101,60	97,66	nasycený vodou	0,009922	305,7	30,81	
	5d	85,20	98,76	nasycený vodou	0,008414	277,7	33,00	
	6a	101,78	95,50	nasycený vodou	0,00972	314,8	32,39	
	6b	100,28	97,52	nasycený vodou	0,009779	321,5	32,88	
	6d	90,97	98,03	nasycený vodou	0,008918	289,5	32,46	
	7d	82,19	98,36	nasycený vodou	0,008084	263,1	32,54	
	6c	100,30	97,81	vysušený	0,00981	324,1	33,04	35,05
	7a	102,93	96,89	vysušený	0,009973	358,0	35,90	
	7b	104,02	97,49	vysušený	0,010141	367,2	36,21	
	7c	103,63	99,96	vysušený	0,010359	344,2	33,23	
28. 2. - 11,9	5a	100,51	97,45	nasycený vodou	0,009795	282,0	28,79	27,56
	5b	100,59	98,02	nasycený vodou	0,00986	270,6	27,44	
	5c	100,65	98,72	nasycený vodou	0,009936	278,3	28,01	
	5d	90,31	98,22	nasycený vodou	0,00887	229,6	25,88	
	6a	100,24	100,48	nasycený vodou	0,010072	278,9	27,69	
	6b	99,81	99,97	nasycený vodou	0,009978	321,1	32,18	
	6c	99,99	98,66	vysušený	0,009865	319,0	32,34	31,04
	7a	100,35	99,06	vysušený	0,009941	296,0	29,78	
	7b	100,02	98,79	vysušený	0,009881	301,5	30,51	
	7c	100,49	98,96	vysušený	0,009944	313,4	31,51	

vzorky krychle 100 x 100								
označení záměsi	vzorek	rozměry [mm]		Stav	plocha [m <sup>2</sup> ]	síla [kN]	pevnost vzorku v tlaku [MPa]	průměrná pevnost vzorku v tlaku [MPa]
		b	c					
7. 3. - 0	5a	99,96	103,14	vysušený	0,01031	296,5	28,76	28,87
	5b	100,43	100,31	vysušený	0,010074	290,7	28,86	
	5c	99,67	99,87	vysušený	0,009954	282,7	28,40	
	6a	100,03	100,50	vysušený	0,010053	303,8	30,22	
	6b	100,09	101,72	vysušený	0,010181	304,5	29,91	
	6c	100,08	100,45	vysušený	0,010053	272,4	27,10	
	7a	100,95	98,54	nasycený vodou	0,009948	292,4	29,39	28,21
	7b	100,88	98,90	nasycený vodou	0,009977	277,6	27,82	
	7c	100,00	98,88	nasycený vodou	0,009888	274,1	27,72	
	7d	90,55	99,66	nasycený vodou	0,009024	251,7	27,89	
7. 3. - 4	5a	100,32	101,37	vysušený	0,010169	265,3	26,09	25,76
	5b	100,31	99,83	vysušený	0,010014	247,6	24,73	
	5c	100,39	100,64	vysušený	0,010103	255,9	25,33	
	6a	101,31	96,62	vysušený	0,009789	258,2	26,38	
	6b	103,19	98,33	vysušený	0,010147	264,2	26,04	
	6c	102,50	96,73	vysušený	0,009915	269,2	27,15	
	6c	87,92	97,84	vysušený	0,008602	211,8	24,62	23,93
	7a	101,15	98,11	nasycený vodou	0,009924	216,6	21,83	
	7b	100,54	98,56	nasycený vodou	0,009909	244,8	24,70	
	7c	100,10	98,28	nasycený vodou	0,009838	240,0	24,40	
	7d	91,20	98,67	nasycený vodou	0,008999	223,2	24,80	
7. 3. - 8	5a	100,10	100,56	vysušený	0,010066	281,7	27,99	26,28
	5b	100,28	97,16	vysušený	0,009743	260,5	26,74	
	5c	100,14	97,54	vysušený	0,009768	248,9	25,48	
	6a	100,05	97,98	vysušený	0,009803	252,0	25,71	
	6b	99,89	103,70	vysušený	0,010359	267,2	25,80	
	6c	100,10	99,46	vysušený	0,009956	258,6	25,97	
	7a	101,18	96,53	nasycený vodou	0,009767	229,6	23,51	23,27
	7b	100,53	96,89	nasycený vodou	0,00974	226,5	23,25	
	7c	99,26	98,49	nasycený vodou	0,009776	226,7	23,19	
	7d	91,59	99,14	nasycený vodou	0,00908	210,0	23,13	



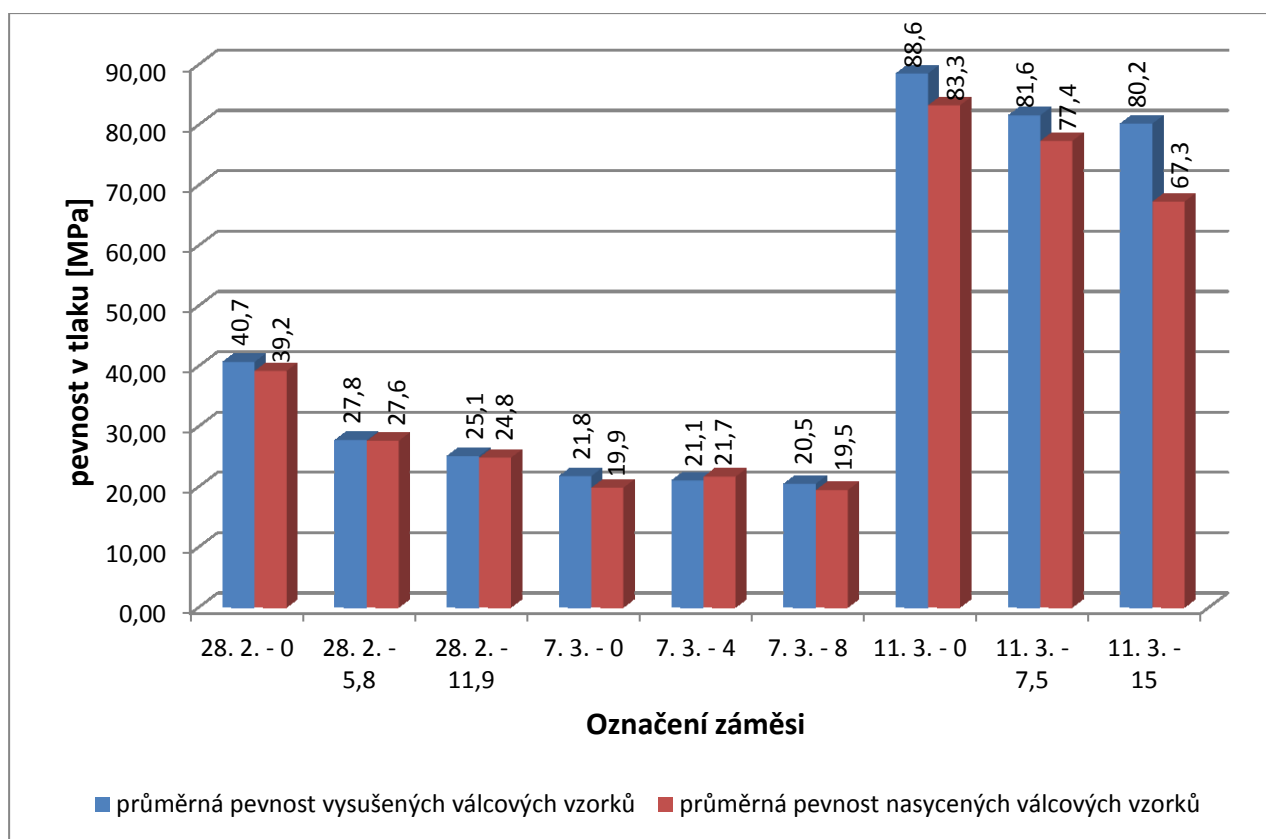
vzorky krychle 100 x 100								
označení záměsi	vzorek	rozměry [mm]		Stav	plocha [m <sup>2</sup> ]	síla [kN]	pevnost vzorku v tlaku [MPa]	průměrná pevnost vzorku v tlaku [MPa]
		b	c					
11. 3. - 0	5a	99,95	99,98	vysušený	0,009993	985,8	98,65	96,70
	5b	100,28	100,11	vysušený	0,010039	1005,7	100,18	
	5c	99,99	98,57	vysušený	0,009856	945,2	95,90	
	6a	100,09	101,20	vysušený	0,010129	977,3	96,48	
	6b	100,00	103,34	vysušený	0,010334	962,1	93,10	
	6c	100,83	101,82	vysušený	0,010267	984,6	95,90	
	7a	102,14	101,63	nasycený vodou	0,01038	1045,3	100,70	99,50
	7b	101,00	101,37	nasycený vodou	0,010238	1010,8	98,73	
	7c	101,89	101,13	nasycený vodou	0,010304	1045,9	101,50	
	7d	86,99	100,79	nasycený vodou	0,008768	851,0	97,06	
11. 3. - 7,5	5a	100,27	99,66	vysušený	0,009993	907,5	90,81	91,16
	5b	100,53	100,83	vysušený	0,010136	924,8	91,24	
	5c	100,23	101,83	vysušený	0,010206	928,0	90,92	
	6a	100,44	99,93	vysušený	0,010037	909,2	90,59	
	6b	99,95	101,76	vysušený	0,010171	895,6	88,06	
	6c	100,15	100,75	vysušený	0,01009	962,0	95,34	
	7a	100,83	97,56	nasycený vodou	0,009837	824,2	83,79	89,58
	7b	101,11	98,42	nasycený vodou	0,009951	894,0	89,84	
	7c	100,31	99,11	nasycený vodou	0,009942	915,5	92,09	
	7d	90,18	99,67	nasycený vodou	0,008988	832,4	92,61	
11. 3. - 15	5a	100,38	100,72	vysušený	0,01011	848,8	83,95	84,74
	5b	100,03	100,44	vysušený	0,010047	865,8	86,17	
	5c	100,15	101,08	vysušený	0,010123	779,0	76,95	
	6a	103,31	98,92	vysušený	0,010219	724,5	70,89	
	6b	103,02	98,96	vysušený	0,010195	966,8	94,83	
	6c	102,23	99,55	vysušený	0,010177	939,6	92,33	
	6d	84,01	99,88	vysušený	0,008391	739,0	88,07	
	7a	102,10	98,61	nasycený vodou	0,010068	954,9	94,84	88,21
	7b	102,43	100,39	nasycený vodou	0,010283	885,4	86,10	
	7c	102,44	101,10	nasycený vodou	0,010357	876,6	84,64	
	7d	84,35	102,59	nasycený vodou	0,008653	755,1	87,26	

Tab. 19: Stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech válcových vzorků

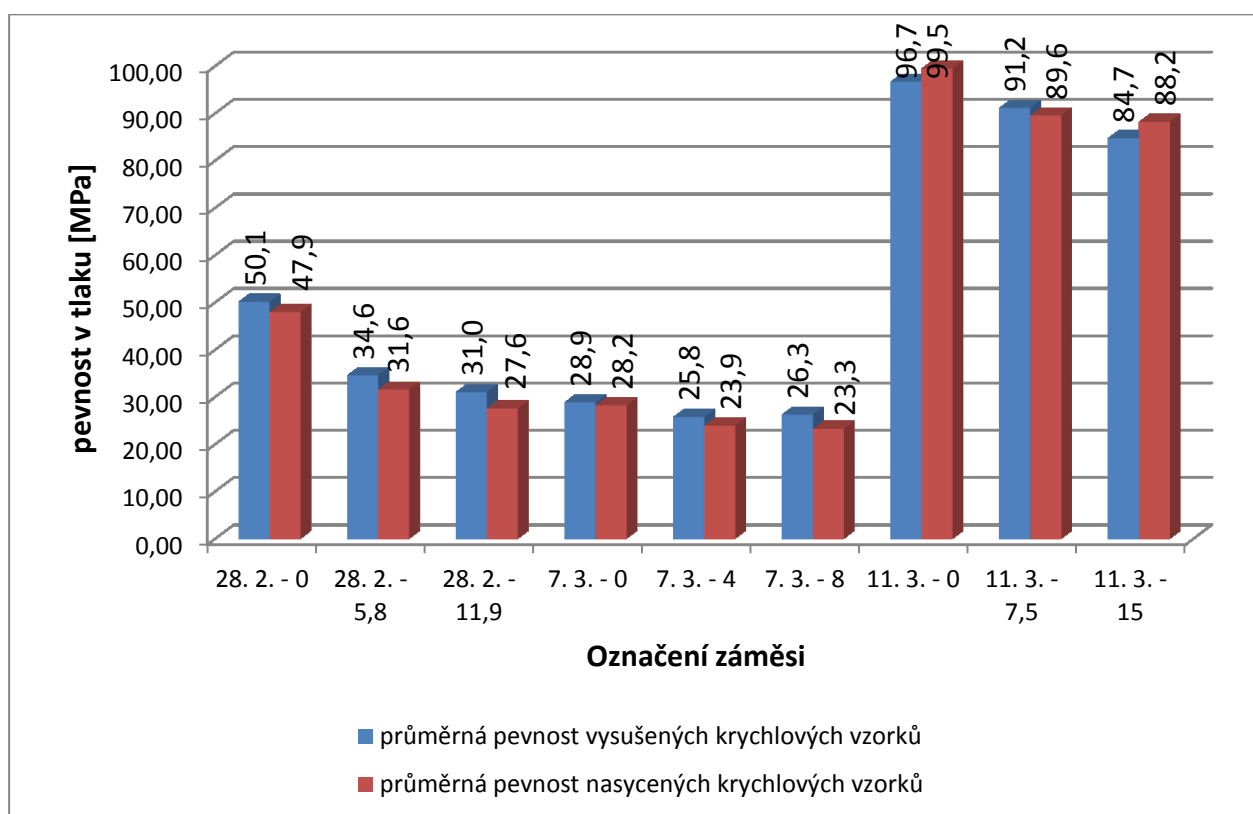
označení záměsí	vzorek	rozměry [mm]	Stav	plocha [m <sup>2</sup> ]	síla [kN]	pevnost v tlaku [MPa]	průměrná pevnost v tlaku [MPa]
		průměr d					
28. 2. - 0	1	149,58	nasycený vodou	0,017573	680,3	38,71	39,22
	2	149,47	nasycený vodou	0,017547	697,1	39,73	
	3	149,12	vysušený	0,017465	708,2	40,55	40,72
	4	149,46	vysušený	0,017544	717,4	40,89	
28. 2. - 5,8	1	149,39	nasycený vodou	0,017528	497,5	28,38	27,64
	2	149,19	nasycený vodou	0,017481	470,1	26,89	
	3	149,14	vysušený	0,017469	494,1	28,28	27,75
	4	149,55	vysušený	0,017566	478,2	27,22	
28. 2. - 11,9	1	149,00	nasycený vodou	0,017437	413,2	23,70	24,84
	2	149,00	nasycený vodou	0,017437	453,2	25,99	
	3	149,42	vysušený	0,017535	431,6	24,61	25,11
	4	149,27	vysušený	0,0175	448,1	25,61	
7. 3. - 0	1	149,02	vysušený	0,017441	365,8	20,97	21,79
	2	149,07	vysušený	0,017453	394,7	22,62	
	3	149,06	nasycený vodou	0,017451	344,7	19,75	19,85
	4	149,10	nasycený vodou	0,01746	348,4	19,95	
7. 3. - 4	1	149,07	vysušený	0,017453	354,1	20,29	21,07
	2	149,08	vysušený	0,017455	381,4	21,85	
	3	149,90	nasycený vodou	0,017648	378,4	21,44	21,69
	4	149,31	nasycený vodou	0,017509	384,2	21,94	
7. 3. - 8	1	149,05	vysušený	0,017448	353,4	20,25	20,52
	2	149,24	vysušený	0,017493	363,5	20,78	
	3	149,37	nasycený vodou	0,017523	362,0	20,66	19,46
	4	149,18	nasycený vodou	0,017479	319,2	18,26	
11. 3. - 0	1	149,17	vysušený	0,017476	1560,6	89,30	88,55
	2	149,65	vysušený	0,017589	1544,4	87,80	
	3	149,41	nasycený vodou	0,017533	1432,8	81,72	83,28
	4	149,26	nasycený vodou	0,017498	1484,4	84,83	
11. 3. - 7,5	1	149,12	vysušený	0,017465	1444,5	82,71	81,61
	2	149,07	vysušený	0,017453	1405,0	80,50	
	3	149,02	nasycený vodou	0,017441	1360,5	78,00	77,36
	4	149,32	nasycený vodou	0,017512	1343,4	76,71	
11. 3. - 15	1	149,37	vysušený	0,017523	1436,1	81,95	80,25
	2	149,55	vysušený	0,017566	1379,7	78,55	
	3	149,36	nasycený vodou	0,017521	1207,5	68,92	67,31
	4	149,22	nasycený vodou	0,017488	1149,0	65,70	

Tab. 20: Stanovení vlhkosti nasycených vzorků

označení záměsi	průměrná vlhkost [%]
28. 2. - 0	5,69
28. 2. - 5,8	5,70
28. 2. - 11,9	6,00
7. 3. - 0	6,77
7. 3. - 4	6,96
7. 3. - 8	7,18
11. 3. - 0	4,50
11. 3. - 7,5	4,96
11. 3. - 15	4,93



Obr. 35: Srovnání tlakové pevnosti nasycených a vysušených válcových vzorků



Obr. 36: Srovnání tlakové pevnosti nasycených a vysušených krychlových vzorků

### 5.7.7 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou

Přístroj k měření modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou se skládá z měřicího přístroje a dvou sond (obr. 37). Jedna sonda pracuje jako budič, vyvolávající ultrazvukové vlnění a druhá jako snímač. K provedení této zkoušky je potřebné nejdříve určit rozměry zkoušených těles a jejich hmotnost. Z těchto změřených hodnot je poté nutné stanovit objemovou hmotnost zkušebních těles. Při této metodě se měří čas, který potřebuje ultrazvuková vlna k přechodu z budiče do snímače. Tento čas se na základě změřené délky zkoušeného vzorku přepočte na rychlost vlnění. Dále se již vypočítá dynamický modul pružnosti pomocí vztahu [10]:

$$E_{BU} = \rho_v \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad (26.)$$

Zkouška byla provedena na válcových vzorcích. Naměřené hodnoty času průchodu ultrazvukových vln tělesem a následně vypočtené hodnoty modulu pružnosti byly zaznamenány do (tab. 21). Z vypočtených hodnot byl poté vypočten aritmetický průměr pro každou záměs, jejich hodnoty byly zaneseny do grafu (obr. 38).



Obr. 37: Přístroj k určení dynamického modulu pružnosti Proceq Tico

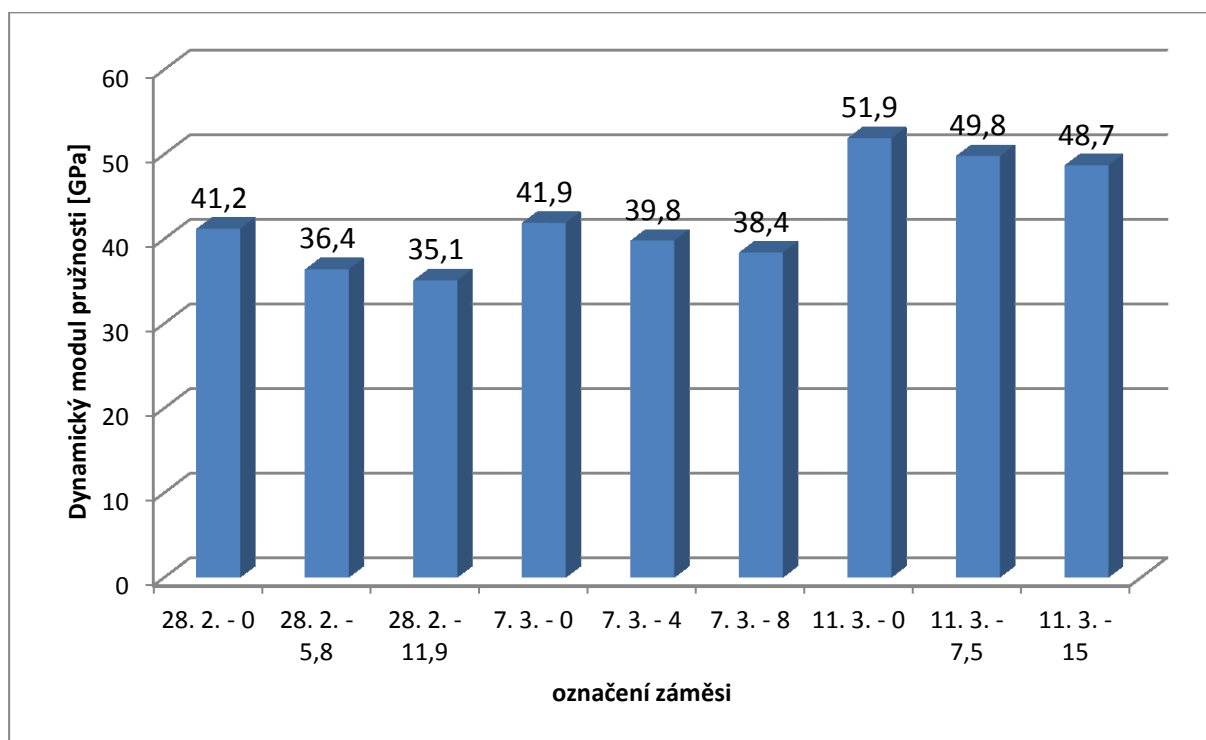
Tab. 21: Stanovení dynamického modulu pružnosti

Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou										průměr E [GPa]
těleso	rozměry [mm]		hmotnost [kg]	$\rho$ kg . m <sup>-3</sup>	měření			E [GPa]	Prům. E [GPa]	
válec	průměr	délka			číslo	t [μs]	v [m/s]			
28. 2. - 0-1	149,58	298	12,1515	2320	1	70,3	4240	41,7	42	41,2
					2	69,4	4290	42,7		
					3	70,5	4230	41,5		
28. 2. - 0-2	149,47	294	12,0195	2330	1	69,6	4220	41,5	42,4	
					2	68,6	4290	42,9		
					3	68,5	4290	42,9		
28. 2. - 0-3	149,12	296	12,0635	2330	1	72,7	4070	38,6	40,3	
					2	70,3	4210	41,3		
					3	70,4	4200	41,1		
28. 2. - 0-4	149,46	293	11,8940	2310	1	70,8	4140	39,6	40	
					2	70,4	4160	40,0		
					3	70,1	4180	40,4		
28. 2. - 11,9-1	149,00	289	11,1180	2210	1	71,6	4040	36,1	35,8	35,1
					2	71,7	4030	35,9		
					3	72,3	4000	35,4		
28. 2. - 11,9-2	149,00	292	11,1365	2190	1	73,4	3980	34,7	35	
					2	72,6	4020	35,4		
					3	73,2	3990	34,9		
28. 2. - 11,9-3	149,42	290	11,0415	2170	1	71,2	4070	35,9	35,3	
					2	72,1	4020	35,1		
					3	72,4	4010	34,9		
28. 2. - 11,9-4	149,27	294	11,2550	2190	1	73,9	3980	34,7	34,1	
					2	74,6	3940	34,0		
					3	75,0	3920	33,7		
28. 2. - 5,8-1	149,39	291	11,4010	2240	1	71,3	4080	37,3	37,5	36,4
					2	71,3	4080	37,3		
					3	70,6	4120	38,0		
28. 2. - 5,8-2	149,19	292	11,3955	2230	1	71,1	4110	37,7	37,4	
					2	72,2	4040	36,4		
					3	70,6	4140	38,2		
28. 2. - 5,8-3	149,14	290	11,2190	2210	1	72,1	4020	35,7	34,8	
					2	73,9	3920	34,0		
					3	73,2	3960	34,7		
28. 2. - 5,8-4	149,55	291	11,4075	2230	1	73,6	3950	34,8	35,8	
					2	72,6	4010	35,9		
					3	71,6	4060	36,8		

Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou										průměr E [GPa]
těleso	rozměry [mm]		hmotnost [kg]	ρ kg . m <sup>-3</sup>	měření			E [GPa]	Prům. E [GPa]	
válec	průměr	délka			číslo	t [μs]	v [m/s]			
7. 3. - 0-1	149,02	298	12,4225	2390	1	71,3	4180	41,8	41,1	41,9
					2	71,9	4140	41,0		
					3	72,3	4120	40,6		
7. 3. - 0-2	149,07	294	12,2160	2380	1	69,1	4250	43,0	42,5	
					2	69,8	4210	42,2		
					3	69,9	4210	42,2		
7. 3. - 0-3	149,06	296	12,3030	2380	1	70,9	4170	41,4	42,1	
					2	70,2	4220	42,4		
					3	70,1	4220	42,4		
7. 3. - 0-4	149,10	295	12,1800	2360	1	69,8	4230	42,2	42	
					2	69,8	4230	42,2		
					3	70,2	4200	41,6		
7. 3. - 4-1	149,07	298	11,7960	2270	1	71,1	4190	39,9	39,2	39,8
					2	71,7	4160	39,3		
					3	72,3	4120	38,5		
7. 3. - 4-2	149,08	291	11,6725	2300	1	70,1	4150	39,6	39,5	
					2	70,3	4140	39,4		
					3	70,2	4150	39,6		
7. 3. - 4-3	149,90	291	11,8715	2310	1	69,6	4180	40,4	40,8	
					2	68,6	4240	41,5		
					3	69,6	4180	40,4		
7. 3. - 4-4	149,31	295	11,7945	2280	1	71,1	4150	39,3	39,8	
					2	70,8	4170	39,6		
					3	70,1	4210	40,4		
7. 3. - 8-1	149,05	290	11,5135	2280	1	70,7	4100	38,3	37,2	38,4
					2	71,9	4030	37,0		
					3	72,7	3990	36,3		
7. 3. - 8-2	149,24	294	11,5940	2250	1	71,5	4110	38,0	37,7	
					2	72,1	4080	37,5		
					3	71,8	4090	37,6		
7. 3. - 8-3	149,37	289	11,5020	2270	1	69,8	4140	38,9	39,3	
					2	69,9	4130	38,7		
					3	68,7	4210	40,2		
7. 3. - 8-4	149,18	294	11,6755	2270	1	71,1	4140	38,9	39,3	
					2	70,4	4180	39,7		
					3	70,7	4160	39,3		

Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou										průměr E [GPa]
těleso	rozměry [mm]		hmotnost [kg]	□ kg . m <sup>-3</sup>	měření			E [GPa]	Prům. E [GPa]	
válec	průměr	délka			číslo	t [μs]	v [m/s]			
11. 3. - 0-1	149,17	295	12,5805	2440	1	64,3	4590	51,4	51,3	51,9
					2	63,9	4620	52,1		
					3	64,8	4550	50,5		
11. 3. - 0-2	149,65	297	12,7295	2440	1	64,8	4580	51,2	51,9	
					2	64,2	4630	52,3		
					3	64,1	4630	52,3		
11. 3. - 0-3	149,41	300	12,7495	2420	1	65,7	4570	50,5	51,9	
					2	64,5	4650	52,3		
					3	64,1	4680	53,0		
11. 3. - 0-4	149,26	299	12,7360	2430	1	65,0	4600	51,4	52,4	
					2	64,8	4610	51,6		
					3	63,4	4720	54,1		
11. 3. - 7,5-1	149,12	296	12,4920	2420	1	65,6	4510	49,2	50	
					2	64,9	4560	50,3		
					3	64,7	4570	50,5		
11. 3. - 7,5-2	149,07	295	12,6225	2450	1	65,6	4500	49,6	50,5	
					2	64,7	4560	50,9		
					3	64,7	4560	50,9		
11. 3. - 7,5-3	149,02	298	12,4795	2400	1	66,1	4510	48,8	49,7	
					2	66,5	4480	48,2		
					3	63,9	4660	52,1		
11. 3. - 7,5-4	149,32	295	12,3595	2390	1	66,4	4440	47,1	48,8	
					2	65,6	4500	48,4		
					3	64,0	4610	50,8		
11. 3. - 15-1	149,37	298	12,4925	2390	1	65,9	4520	48,8	48,6	
					2	66,3	4490	48,2		
					3	65,9	4520	48,8		
11. 3. - 15-2	149,55	295	12,3895	2390	1	65,9	4480	48,0	48,7	
					2	65,0	4540	49,3		
					3	65,3	4520	48,8		
11. 3. - 15-3	149,36	296	12,4155	2390	1	65,2	4540	49,3	49,8	
					2	64,9	4560	49,7		
					3	64,5	4590	50,4		
11. 3. - 15-4	149,22	294	12,2245	2380	1	66,9	4390	45,9	47,8	
					2	65,4	4500	48,2		
					3	64,6	4550	49,3		





Obr. 38: Znázornění dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé záměsi

### 5.7.8 Stanovení statického modulu pružnosti

Statický modul pružnosti se určuje z deformací, které ve zkoušeném tělese vzniknou vlivem známého zatížení podle Hookova zákona. Statický modul pružnosti je možno vypočítat z rozdílu napětí ( $\Delta\sigma$ ) a rozdílu poměrného přetvoření ( $\Delta\varepsilon$ ) vztahem:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_b} \quad (27.)$$

Statický modul pružnosti byl stanoven na válcových vzorcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Pro provedení této zkoušky je třeba nejprve určit přibližnou pevnost vzorků v tlaku. Tato pevnost byla určena na ostatních zkušebních tělesech a vypočítán aritmetický průměr tlakových pevností  $f_c$  pro každou záměs. Z této hodnoty se vypočítá horní zatěžovací mez  $\sigma_a$ . Výpočet se provedl dle vzorce:

$$\sigma_a = \frac{f_c}{3} \quad (28.)$$

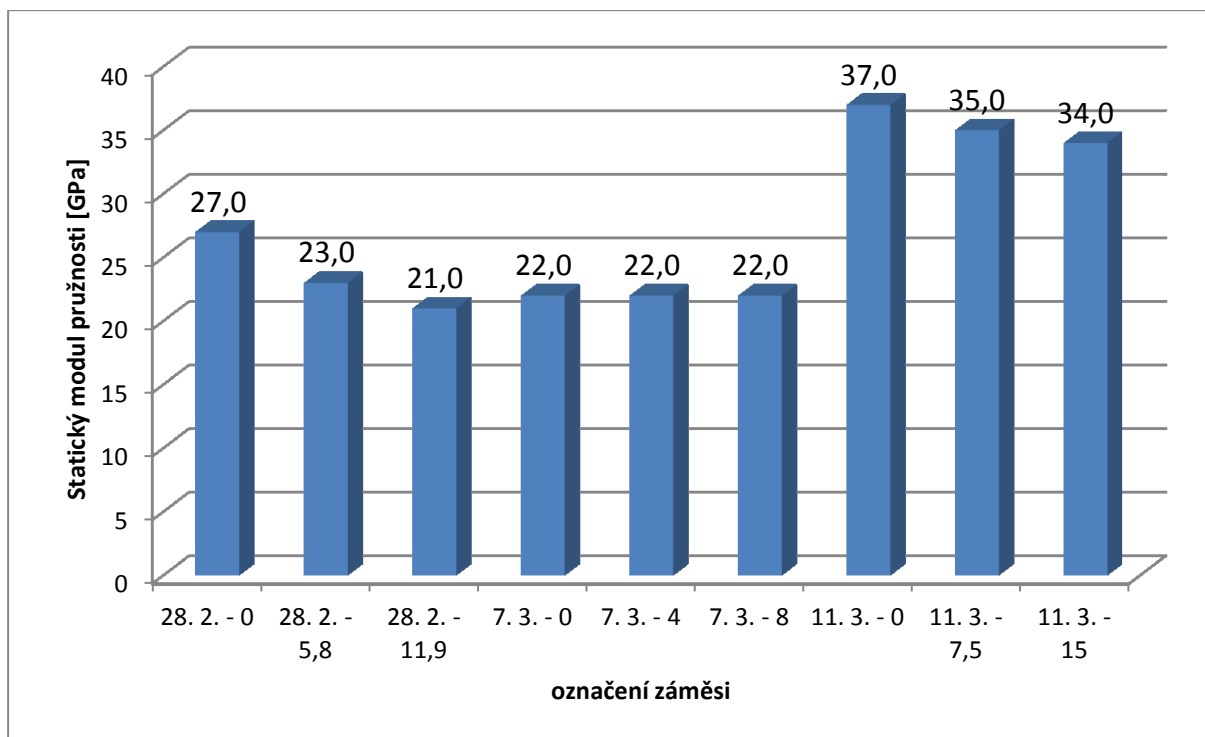
Na těleso se umístilo snímací zařízení ve vzdálenosti 75 mm od horního nebo spodního okraje tělesa. Vzdálenost měřících bodů je 150 mm. Těleso se vložilo do zkušebního zařízení (obr. 39), ve kterém se vycentrovalo. Nejprve se na těleso vyvodí napětí  $\sigma_b$  o velikosti  $0,5 \text{ N.mm}^{-2}$ . Poté se napětí konstantně zvyšuje až k dosažení hodnoty  $\sigma_a$ . Toto napětí se udržuje po dobu 60 sekund, napětí se následně opět plynule sníží na hodnotu  $\sigma_b$ . Odečtou se hodnoty přetvoření, a pokud se tyto hodnoty liší o více jak 20% od průměrné hodnoty, je nutné zkoušku přerušit, vzorek ve zkušebním lisu vycentrovat a zkoušku opakovat. Zatěžovací proces se opakuje dvakrát. Po proběhnutí dvou předběžných cyklů se při napětí  $\sigma_b$  vyčká 60 sekund a odečte se hodnota deformace  $\varepsilon_b$ . Těleso se opět zatíží napětím  $\sigma_a$ . Toto napětí se udrží 60 sekund a odečte se hodnota deformace  $\varepsilon_a$ . Po ukončení zkoušky se sejme ze vzorku měřící zařízení a vzorek se podrobí zkoušce pevnosti v tlaku. Výsledek se zaokrouhlí na nejbližších  $500 \text{ N.m}^{-2}$  [12]. Stanovení statického modulu pružnosti bylo provedeno vždy na 4 válcových vzorcích od každé záměsi, naměřené hodnoty a následně vypočítaný aritmetický průměr pro jednotlivé záměsi je uveden v (tab. 22) a průměrné hodnoty každé záměsi byly zaznamenány do grafu (obr. 40). Tyto hodnoty poté byly porovnány s dynamickým modulem pružnosti, což je patrné na (obr. 41).



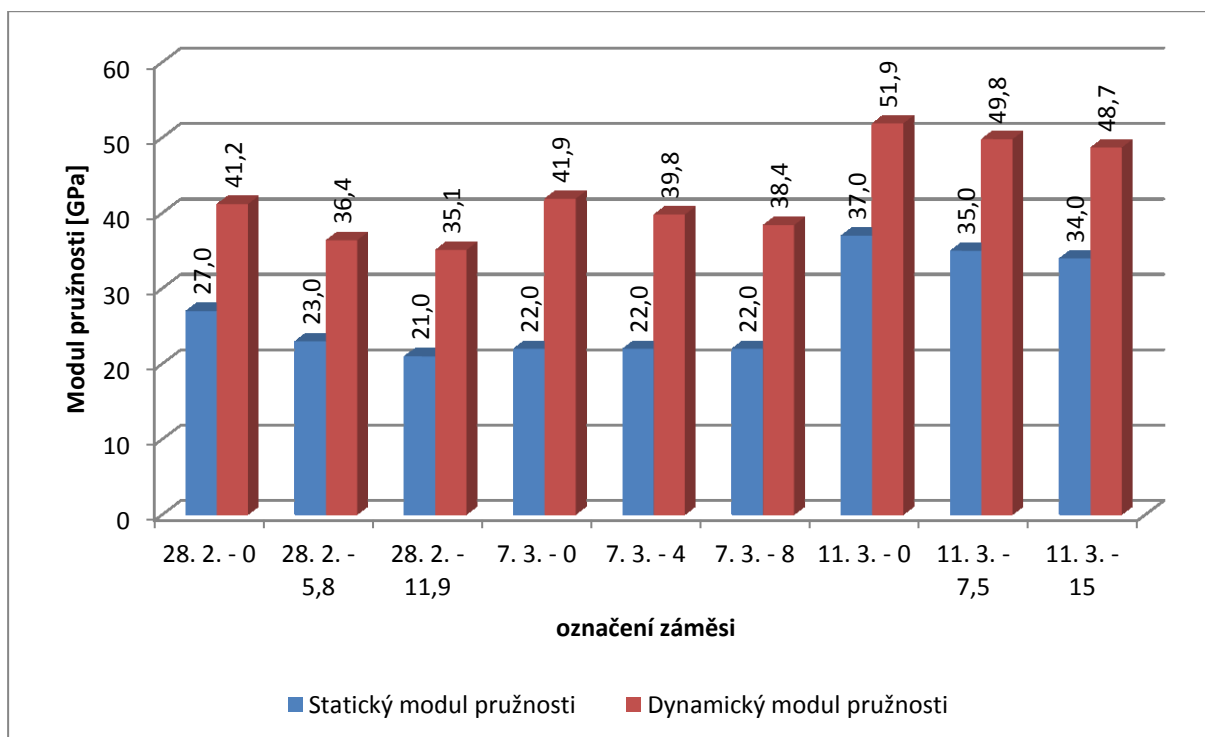
Obr. 39: Těleso umístěné do zkušebního zařízení při zkoušce stanovení statického modulu pružnosti

Tab. 22: Stanovení statického modulu pružnosti

označení záměsi	vzorek	rozměry [mm]	Stav	plocha [m <sup>2</sup> ]	statický modul pružnosti [GPa]	průměrný statický modul pružnosti [GPa]
		průměr d				
28. 2. - 0	1	149,58	nasycený vodou	0,017573	26,0	27,0
	2	149,47	nasycený vodou	0,017547	26,5	
	3	149,12	vysušený	0,017465	27,5	
	4	149,46	vysušený	0,017544	28,0	
28. 2. - 5,8	1	149,39	nasycený vodou	0,017528	22,5	23,0
	2	149,19	nasycený vodou	0,017481	22,5	
	3	149,14	vysušený	0,017469	22,5	
	4	149,55	vysušený	0,017566	23,0	
28. 2. - 11,9	1	149,00	nasycený vodou	0,017437	20,5	21,0
	2	149,00	nasycený vodou	0,017437	21,0	
	3	149,42	vysušený	0,017535	22,0	
	4	149,27	vysušený	0,0175	21,0	
7. 3. - 0	1	149,02	vysušený	0,017441	22,5	22,0
	2	149,07	vysušený	0,017453	22,0	
	3	149,06	nasycený vodou	0,017451	22,5	
	4	149,10	nasycený vodou	0,01746	22,0	
7. 3. - 4	1	149,07	vysušený	0,017453	20,5	22,0
	2	149,08	vysušený	0,017455	22,0	
	3	149,90	nasycený vodou	0,017648	22,5	
	4	149,31	nasycený vodou	0,017509	22,0	
7. 3. - 8	1	149,05	vysušený	0,017448	21,5	22,0
	2	149,24	vysušený	0,017493	22,0	
	3	149,37	nasycený vodou	0,017523	21,5	
	4	149,18	nasycený vodou	0,017479	21,5	
11. 3. - 0	1	149,17	vysušený	0,017476	37,5	37,0
	2	149,65	vysušený	0,017589	36,5	
	3	149,41	nasycený vodou	0,017533	36,5	
	4	149,26	nasycený vodou	0,017498	36,5	
11. 3. - 7,5	1	149,12	vysušený	0,017465	35,0	35,0
	2	149,07	vysušený	0,017453	34,5	
	3	149,02	nasycený vodou	0,017441	34,5	
	4	149,32	nasycený vodou	0,017512	34,0	
11. 3. - 15	1	149,37	vysušený	0,017523	35,0	34,0
	2	149,55	vysušený	0,017566	35,0	
	3	149,36	nasycený vodou	0,017521	34,0	
	4	149,22	nasycený vodou	0,017488	33,5	



Obr. 40: Znázornění statického modulu pružnosti jednotlivých záměsí



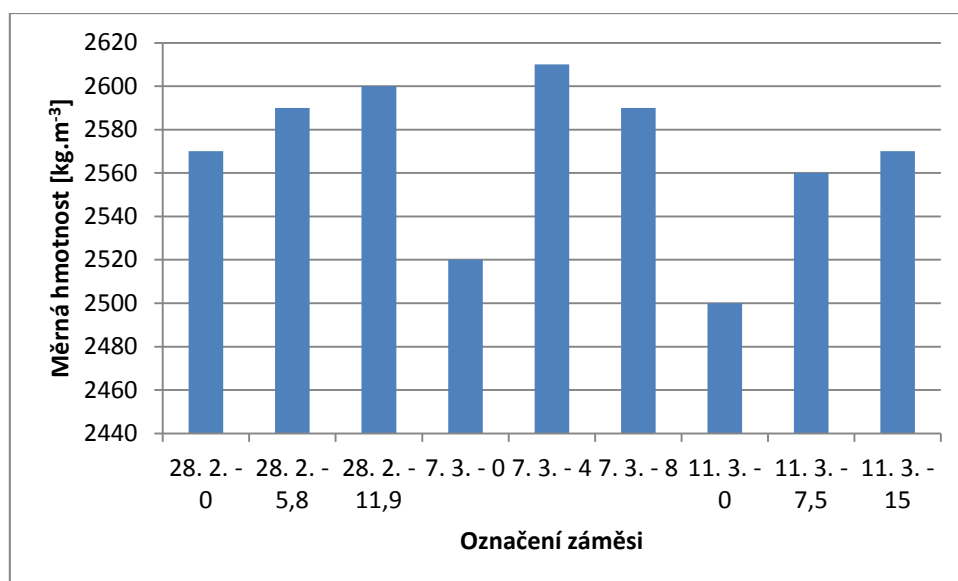
Obr. 41: Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti

### 5.7.9 Stanovení měrné hmotnosti

Postup zkoušky stanovení měrné hmotnosti je podrobněji popsán v kapitole 4.7. Zjištěné hodnoty jsou zaznamenány do (tab. 23).

Tab. 23: Stanovení měrné hmotnosti

záměs:	číslo pyknometru:	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>3</sub> [g]	m <sub>4</sub> [g]	Měrná hmotnost [kg . m <sup>-3</sup> ]	průměrná měrná hmotnost [kg . m <sup>-3</sup> ]
28. 2. - 0	78	26,7136	33,9408	79,8539	75,4334	2570	2570
	3	24,7544	32,0652	80,2209	75,7544	2560	
28. 2. - 5,8	1	24,8389	31,2315	78,1096	74,1727	2600	2590
	2	23,9921	30,0947	80,7591	77,0236	2570	
28. 2. - 11,9	96	23,7429	29,8154	78,6595	74,9212	2590	2600
	99	25,4378	32,8121	80,1141	75,5595	2610	
7. 3. - 0	2	23,9911	29,2546	80,1761	77,0173	2490	2520
	1	24,8377	30,3113	77,4969	74,1754	2540	
7. 3. - 4	96	23,7423	30,1253	78,8663	74,9288	2600	2610
	98	25,5435	30,7155	80,3746	77,1782	2610	
7. 3. - 8	91	24,9009	31,2016	78,8942	75,0245	2580	2590
	92	23,4432	29,9097	78,4376	74,4543	2600	
11. 3. - 0	92	23,4407	28,4859	77,4669	74,4540	2480	2500
	91	24,9016	30,1274	78,1773	75,0242	2510	
11. 3. - 7,5	78	26,7141	31,4632	78,3215	75,4205	2560	2560
	99	25,4265	30,6711	78,7594	75,5673	2550	
11. 3. - 15	3	24,7550	30,0770	79,0157	75,7444	2590	2570
	98	25,5458	32,6212	81,4932	77,1789	2550	



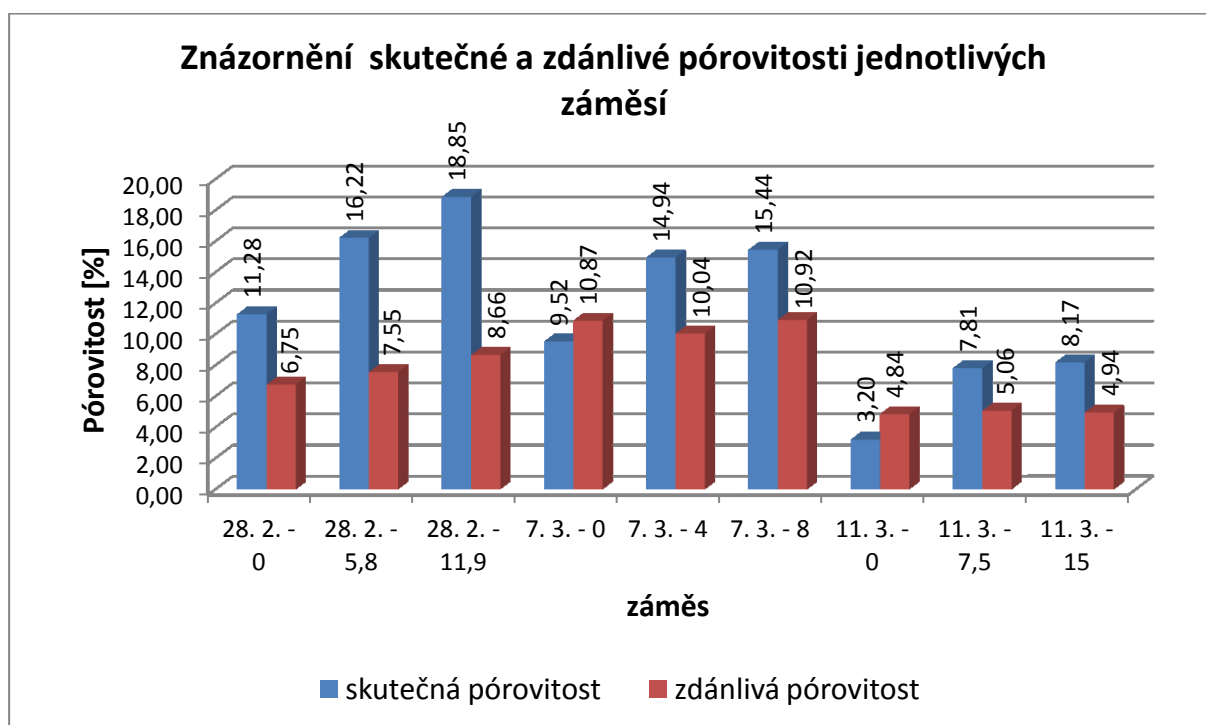
Obr. 42: Měrná hmotnost jednotlivých záměsí

#### 5.7.10 Stanovení skutečné pórovitosti

Postup zkoušky pro určení skutečné pórovitosti je uveden v kapitole 4.8. Vypočtená skutečná pórovitost a naměřené hodnoty jsou zapsány v (tab. 24).

Tab. 24: Stanovení skutečné pórovitosti

záměs:	hustota [kg . m <sup>-3</sup> ]	objemová hmotnost OH [kg.m <sup>-3</sup> ]	skutečná pórovitost [%]	zdánlivá pórovitost [%]
28. 2. - 0	2570	2280	11,28	6,75
28. 2. - 5,8	2590	2170	16,22	7,55
28. 2. - 11,9	2600	2110	18,85	8,66
7. 3. - 0	2520	2280	9,52	10,87
7. 3. - 4	2610	2220	14,94	10,04
7. 3. - 8	2590	2190	15,44	10,92
11. 3. - 0	2500	2420	3,20	4,84
11. 3. - 7,5	2560	2360	7,81	5,06
11. 3. - 15	2570	2360	8,17	4,94



Obr. 43: Srovnání zdánlivé a skutečné pórovitosti

## 6 Diskuze výsledků

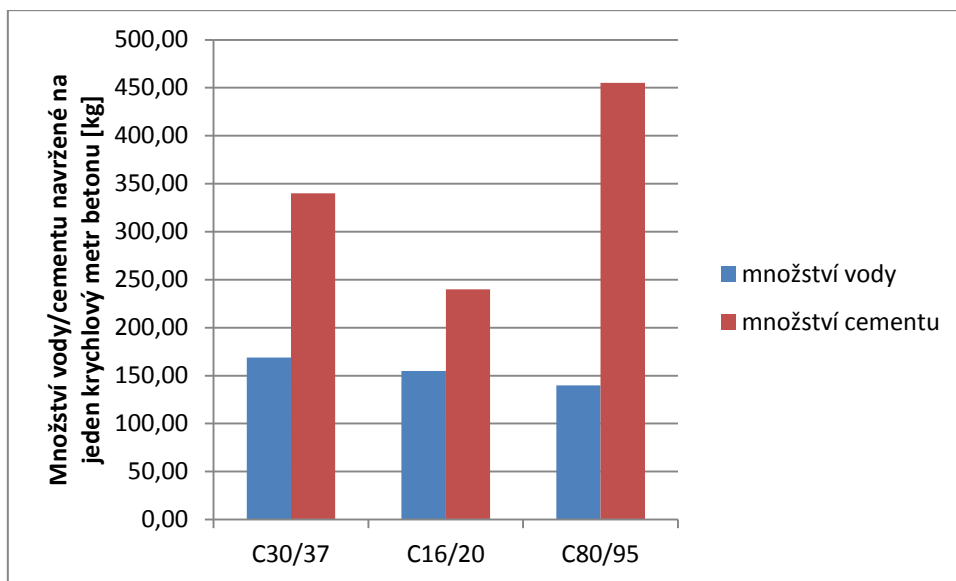
Vzorky připravené podle navržených receptur bez přidané provzdušňující přísady odpovídají navrhované pevnosti, s množstvím přidaného provzdušňovadla však jejich pevnost klesala a vzorky již nedosahují návrhových pevností, jak je vidět v (tab. 25). Množství provzdušňující přísady zvyšuje pórovitost, což vede ke snižování pevnosti zkoušených vzorků.

Tab. 25: Průměrné hodnoty mechanických vlastností na vzorcích připravených podle navržených receptur

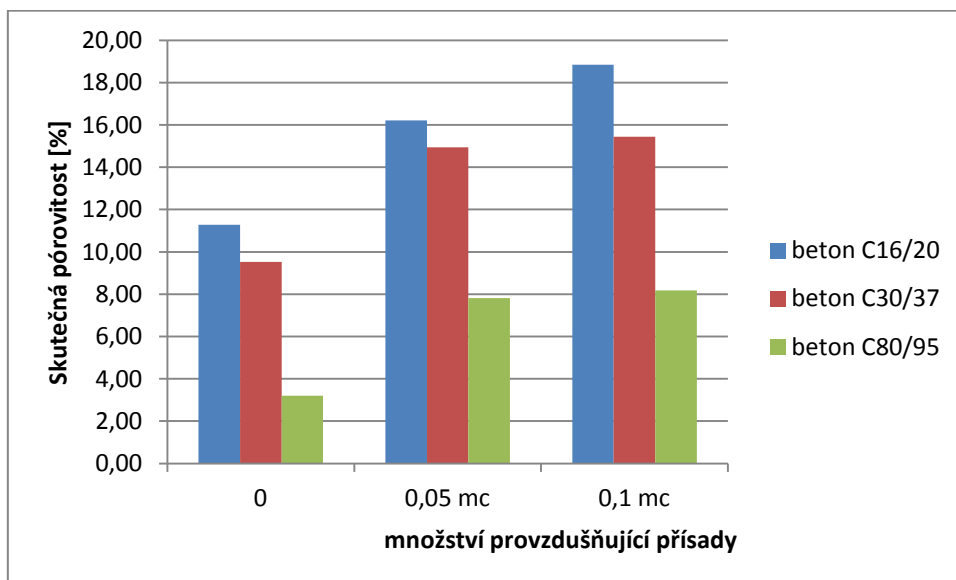
označení záměsi	průměrná pevnost krychlových vzorků nasyčených vodou v tlaku [MPa]	průměrná pevnost krychlových vysušených vzorků v tlaku [MPa]	průměrná pevnost válcových vzorků nasyčených vodou v tlaku [MPa]	průměrná pevnost krychlových vysušených vzorků v tlaku [MPa]	dynamický modul pružnosti [GPa]	statický modul pružnosti [GPa]	skutečná pórovitost [%]	zdánlivá pórovitost [%]
28. 2. - 0	47,94	50,12	39,22	40,72	41,2	27	11,28	6,75
28. 2. - 5,8	31,57	34,59	27,64	27,75	36,4	23	16,22	7,55
28. 2. - 11,9	27,56	31,04	24,84	25,11	35,1	21	18,85	8,66
7. 3. - 0	28,21	28,87	19,85	21,79	41,9	22	9,52	10,87
7. 3. - 4	23,93	25,76	21,69	21,07	39,8	22	14,94	10,04
7. 3. - 8	23,27	26,28	19,46	20,52	38,4	22	15,44	10,92
11. 3. - 0	99,50	96,70	83,28	88,55	51,9	37	3,20	4,84
11. 3. - 7,5	89,58	91,16	77,36	81,61	49,8	35	7,81	5,06
11. 3. - 15	88,21	84,74	67,31	80,25	48,7	34	8,17	4,94

Receptury nižších pevností dosahují vyšší pórovitosti. Tento jev je pravděpodobně zapříčiněn vyšším obsahem vody a zároveň nižším množstvím cementu. Tím pádem došlo i ke zvětšení vodního součinitele, což negativně ovlivňuje pevnost betonu. Tato voda se z materiálu vypařila a zajistila tím těmto vzorkům vyšší pórovitost, což je patrné z (obr. 44, 45).



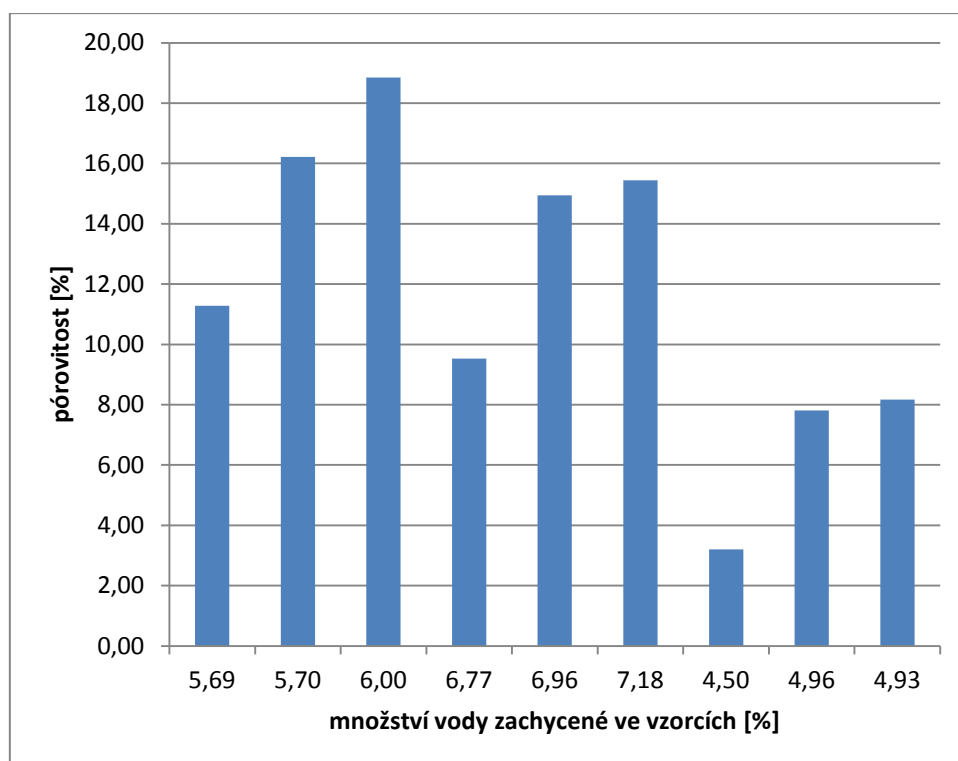


Obr. 44. Množství cementu a vody navržené pro jednotlivé receptury betonu

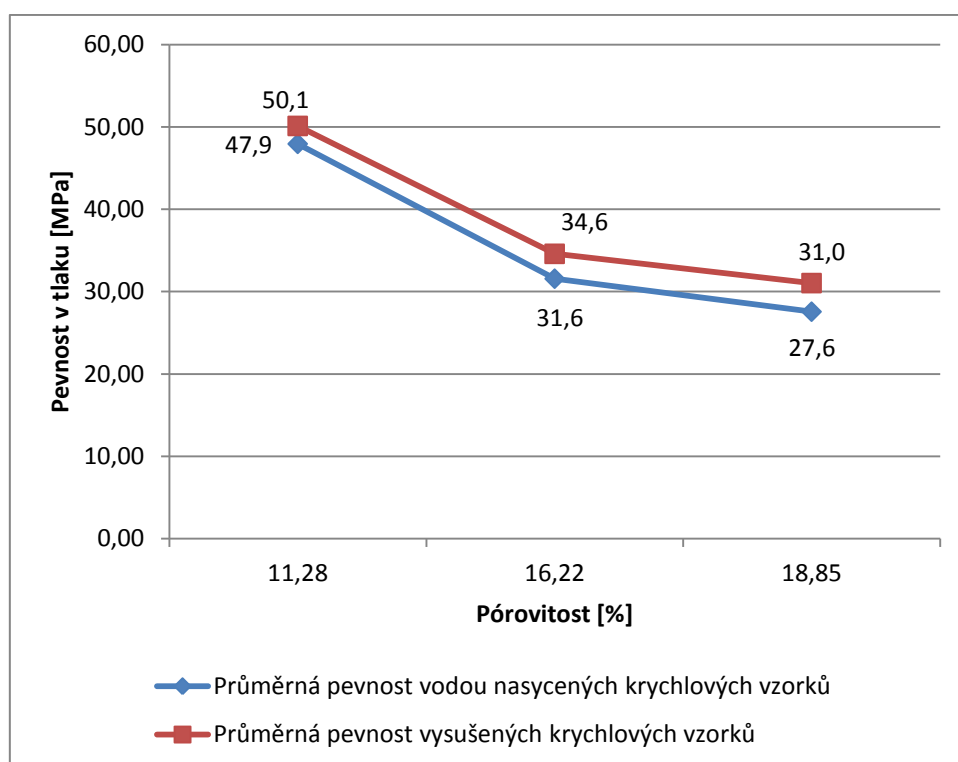


Obr. 45: Závislost pórovitosti na množství přidané provzdušňující přísady

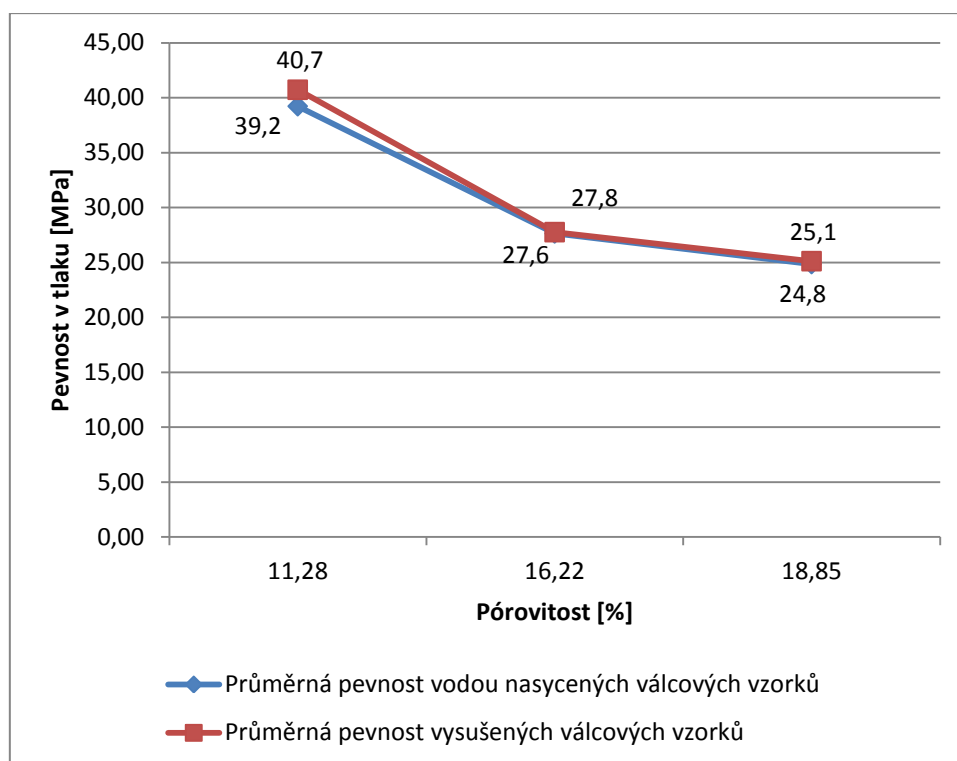
Pórovitost také zvyšuje nasákavost vzorků (obr. 46). Díky většímu počtu pórů dokáže beton zachytit do své struktury větší množství vody. Množství vody, které beton přijal, se tedy se zvětšující se pórovitostí taktéž zvyšuje. Tato voda negativně ovlivňuje zejména pevnost betonu v tlaku. Experimentálně bylo zjištěno, že tomu tak u většiny vzorků skutečně je. Tomuto předpokladu neodpovídají pouze dva druhy vzorků. To však může být způsobeno tím, že vlastnosti betonu nejsou vždy stejné, mohlo například dojít ke kvalitnějšímu zhutnění betonové směsi do formy nebo například výhodnějšímu rozložení pórů. Vliv nasycení vzorku vodou na jeho pevnost ilustrují pro navržené receptury přiložené grafy (obr. 47 – 52).



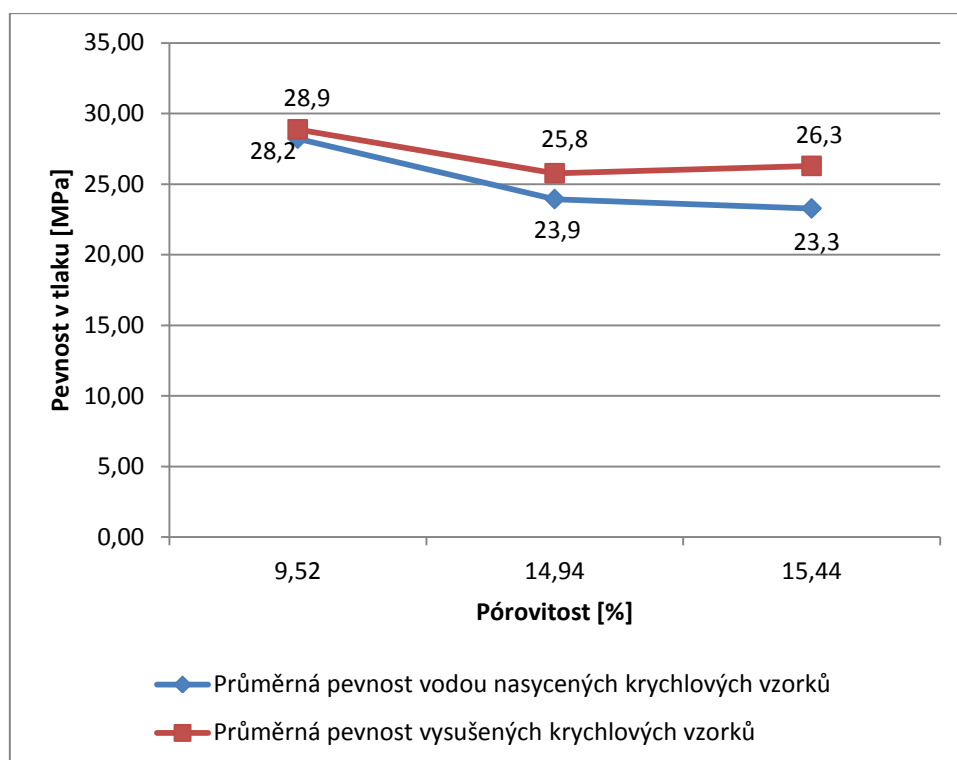
Obr. 46: Vliv pórovitosti na nasákavost betonu



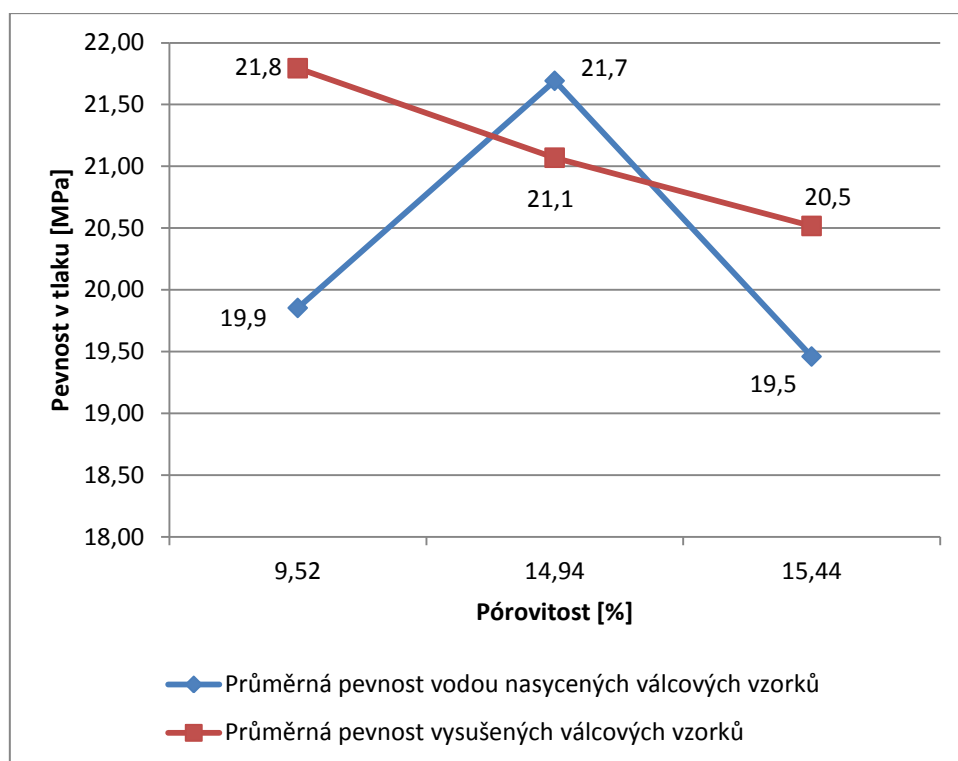
Obr. 47: Závislost pevnosti betonu v tlaku krychlových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C30/37



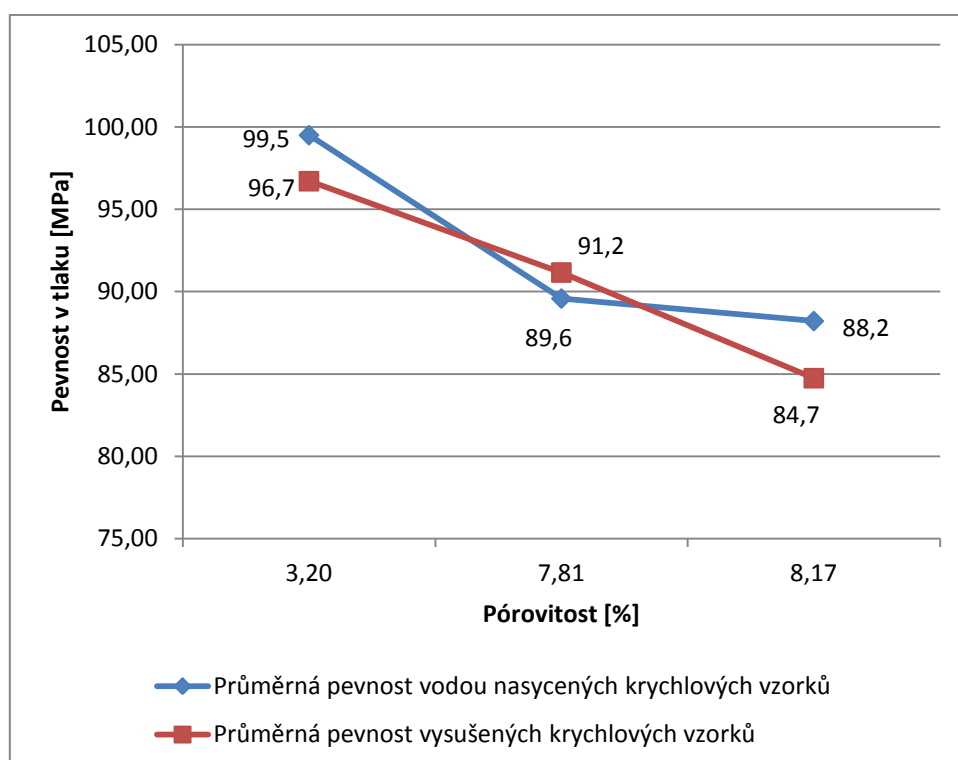
Obr. 48: Závislost pevnosti betonu v tlaku válcových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C30/37



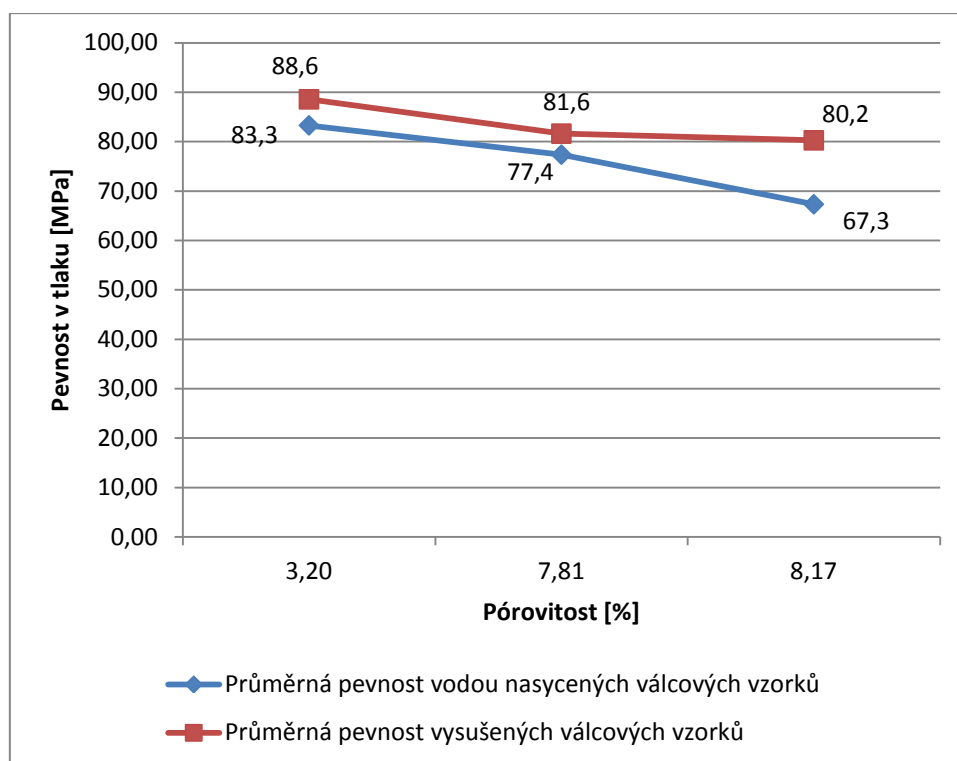
Obr. 49: Závislost pevnosti betonu v tlaku krychlových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C16/20



Obr. 50: Závislost pevnosti betonu v tlaku válcových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C16/20

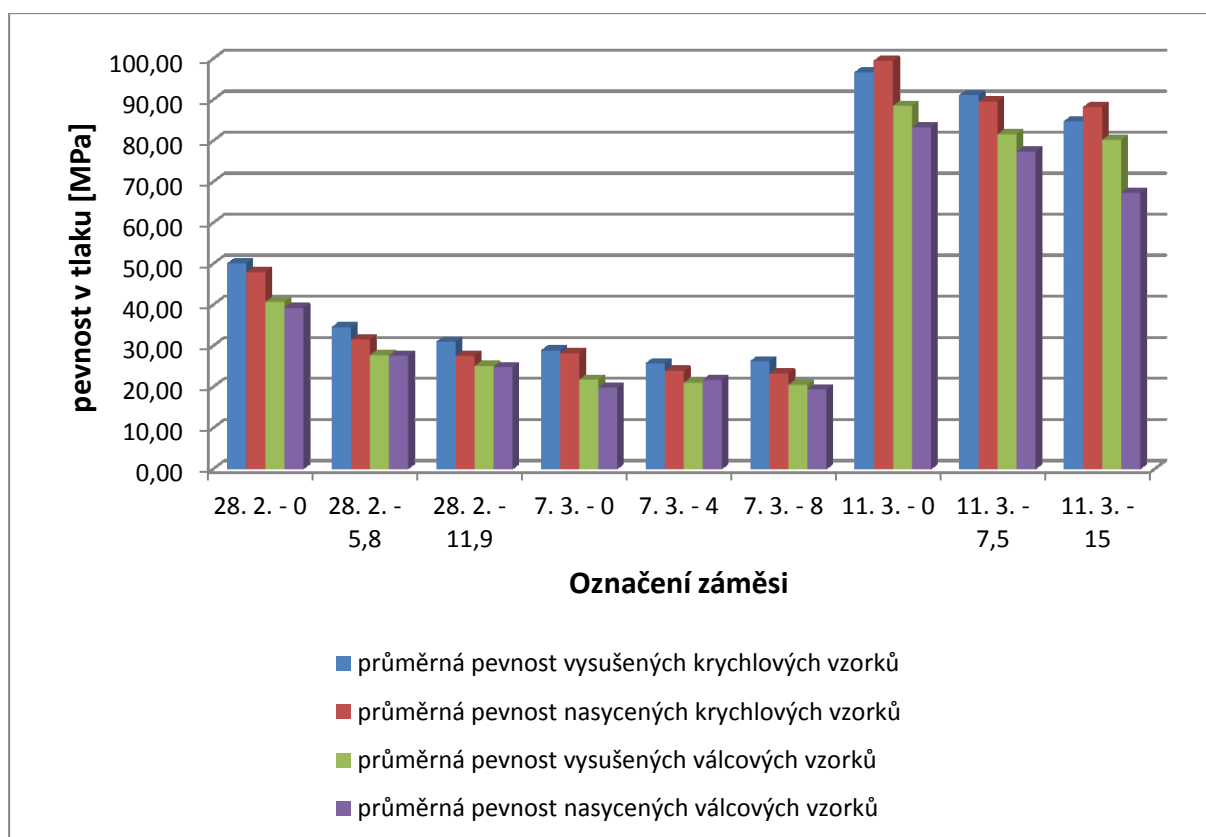


Obr. 51: Závislost pevnosti betonu v tlaku krychlových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C80/95



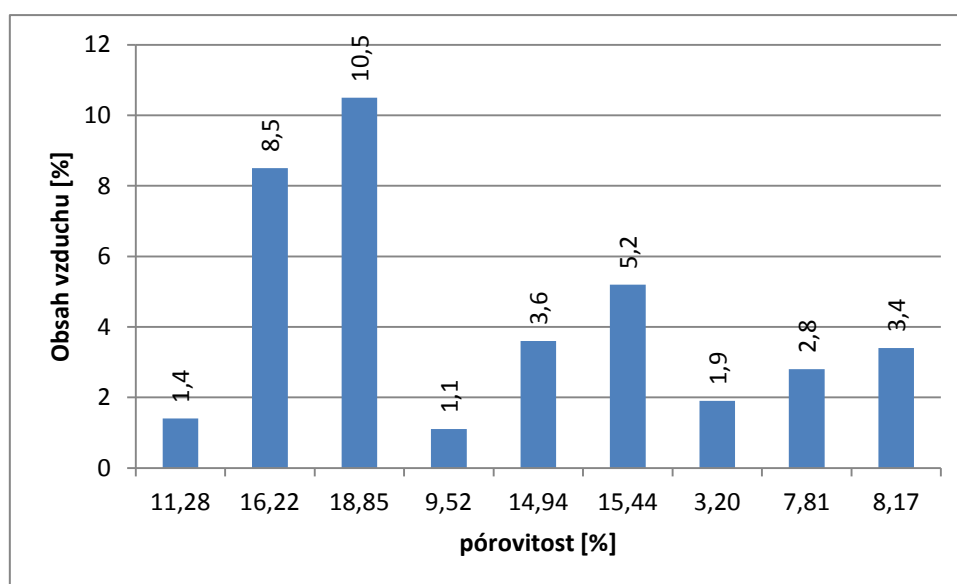
Obr. 52: Závislost pevnosti betonu v tlaku válcových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C80/95

Válcové vzorky dosahují nižší pevnosti v tlaku, než vzorky krychlové. To je dáno hlavně poměrem mezi výškou vzorku a jeho průměrem. Nejnižší pevnosti bylo dosaženo u válcových nasycených vzorků zhotovených z betonové směsi třídy C16/20, naopak nejvyšší pevnosti dosahují nasycené krychlové vzorky zhotovené z betonu C80/95, což odpovídá předpokladům.



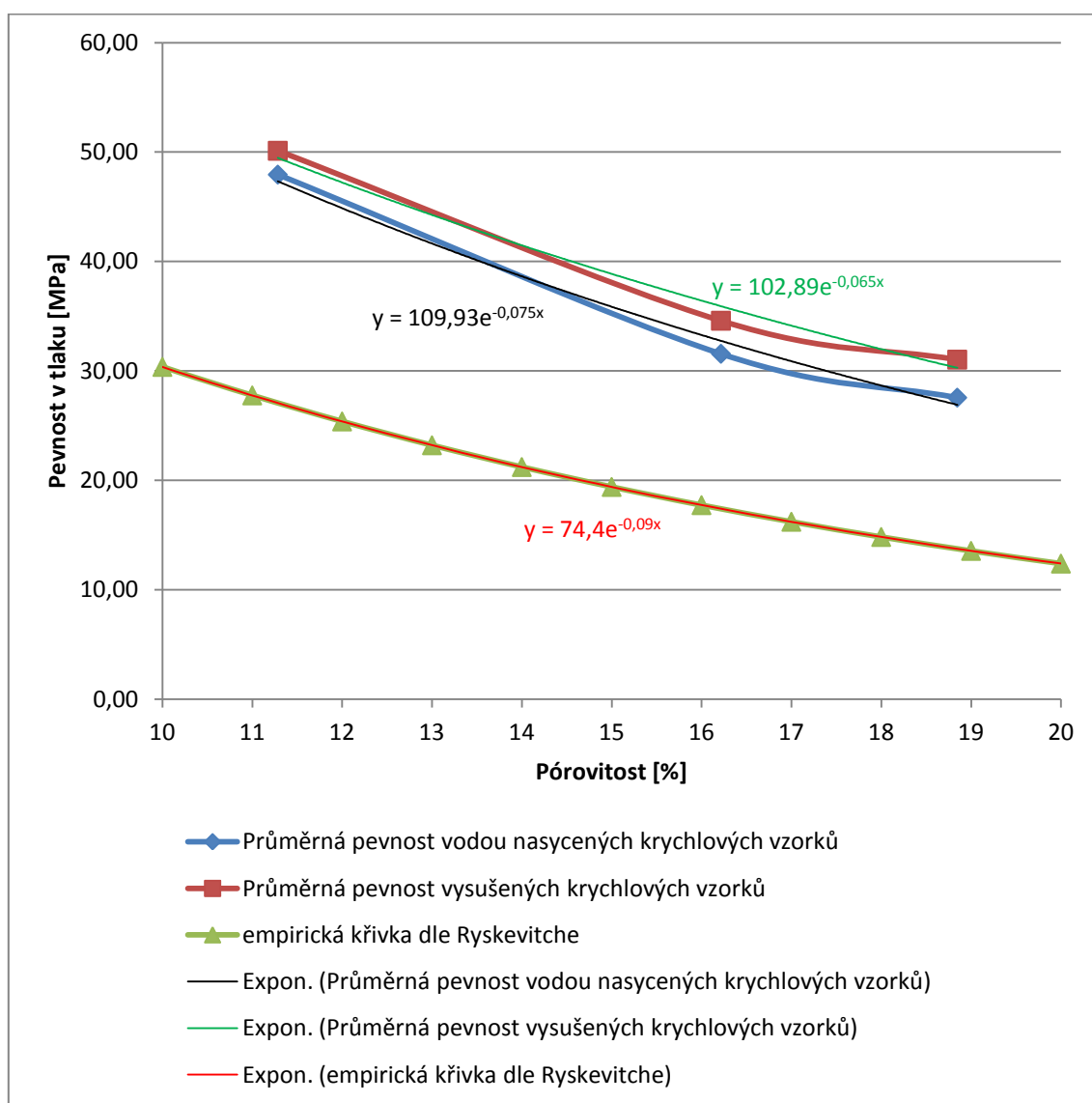
Obr. 53: Srovnání pevností různých typů vzorků

S pórovitostí souvisí i obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi. Čím více vzduchu betonová směs obsahuje, tím vyšší je i jeho následná pórovitost. Této skutečnosti si lze všimnout na (obr. 54).

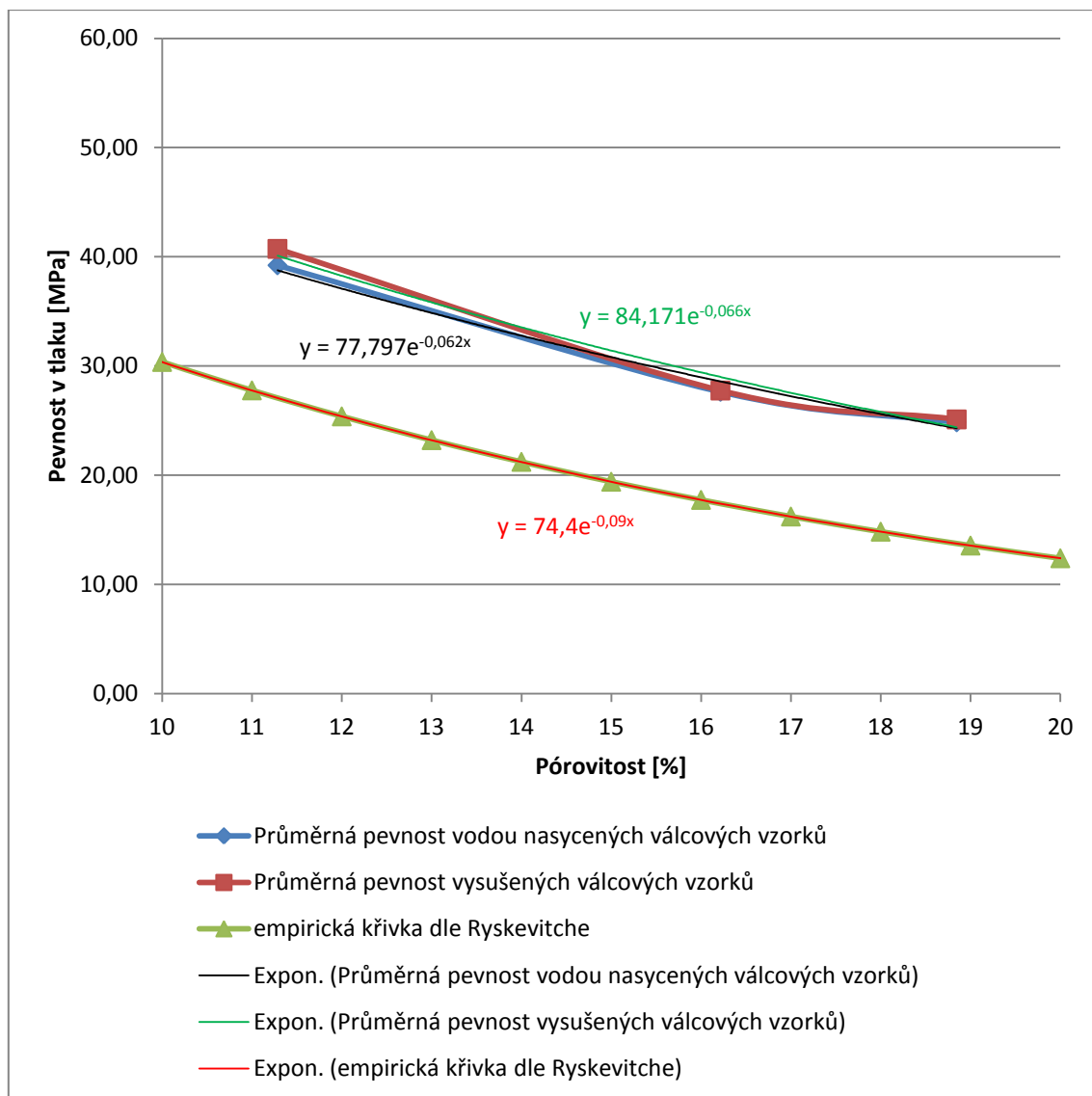


Obr. 54: Závislost pórovitosti a obsahu vzduchu v čerstvé betonové směsi

Experimentálně zjištěné hodnoty pevností v tlaku a pórovitostí byly zaznamenány do grafů a porovnané s empirickou křivkou dle Ryskevitcha [2] (obr. 55 – 60). Zjištěnými hodnotami byla proložena exponenciální spojnice trendu a zjištěna rovnice jejich regrese. Z výsledků je patrné, že rovnice regrese je jiná pro každou recepturu betonu. Dále se její hodnoty liší i pro různý tvar vzorků. Nasycení vodou vzorků však již na tyto rovnice velký vliv nemají a rovnice vycházejí podobné. Zjištěné rovnice také neodpovídají empirickému vyjádření závislosti pevnosti na pórovitosti dle Ryskevitcha [2].

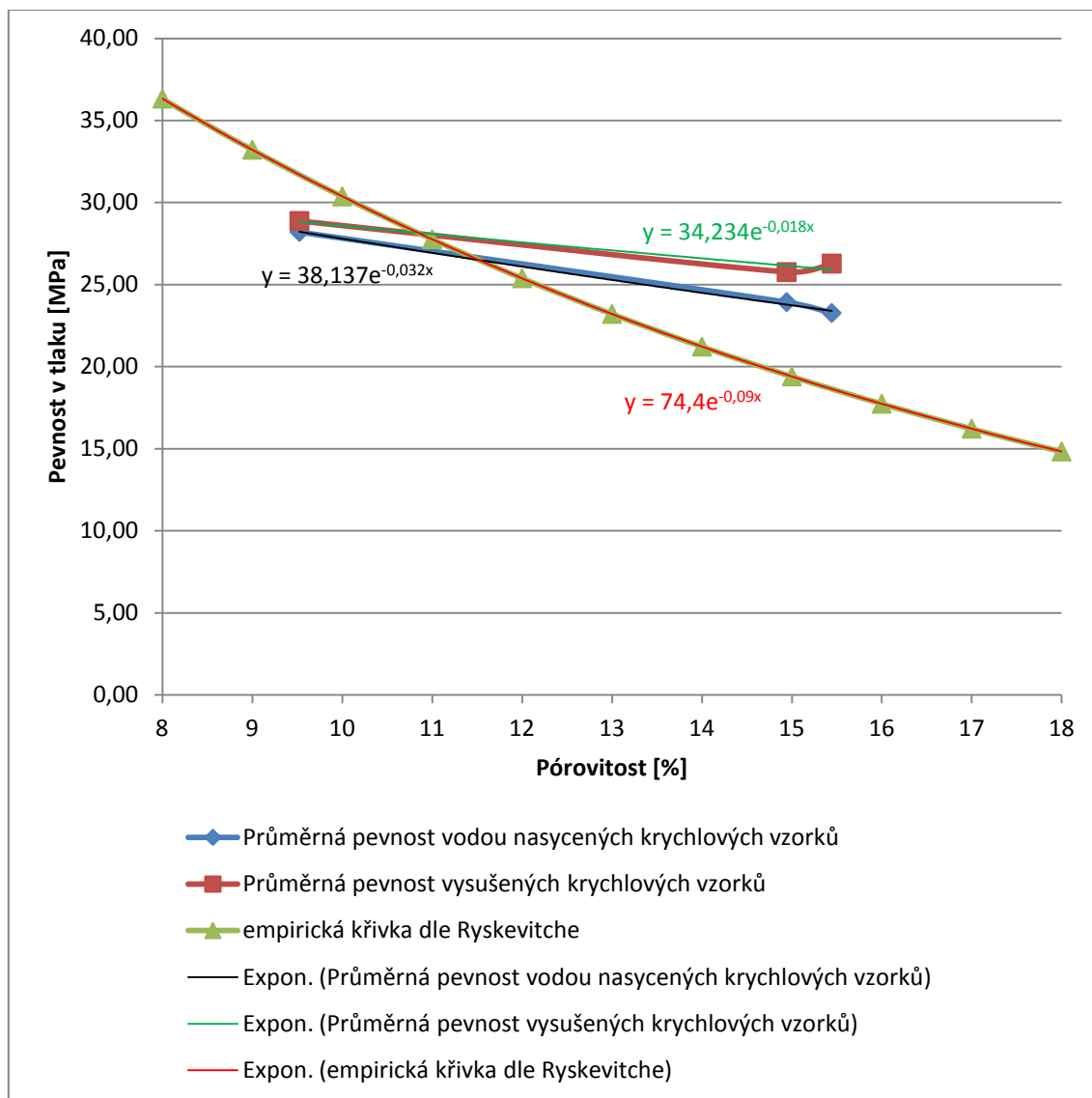


Obr. 55: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí krychlových vzorků připravených podle receptury betonu C 30/37 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha

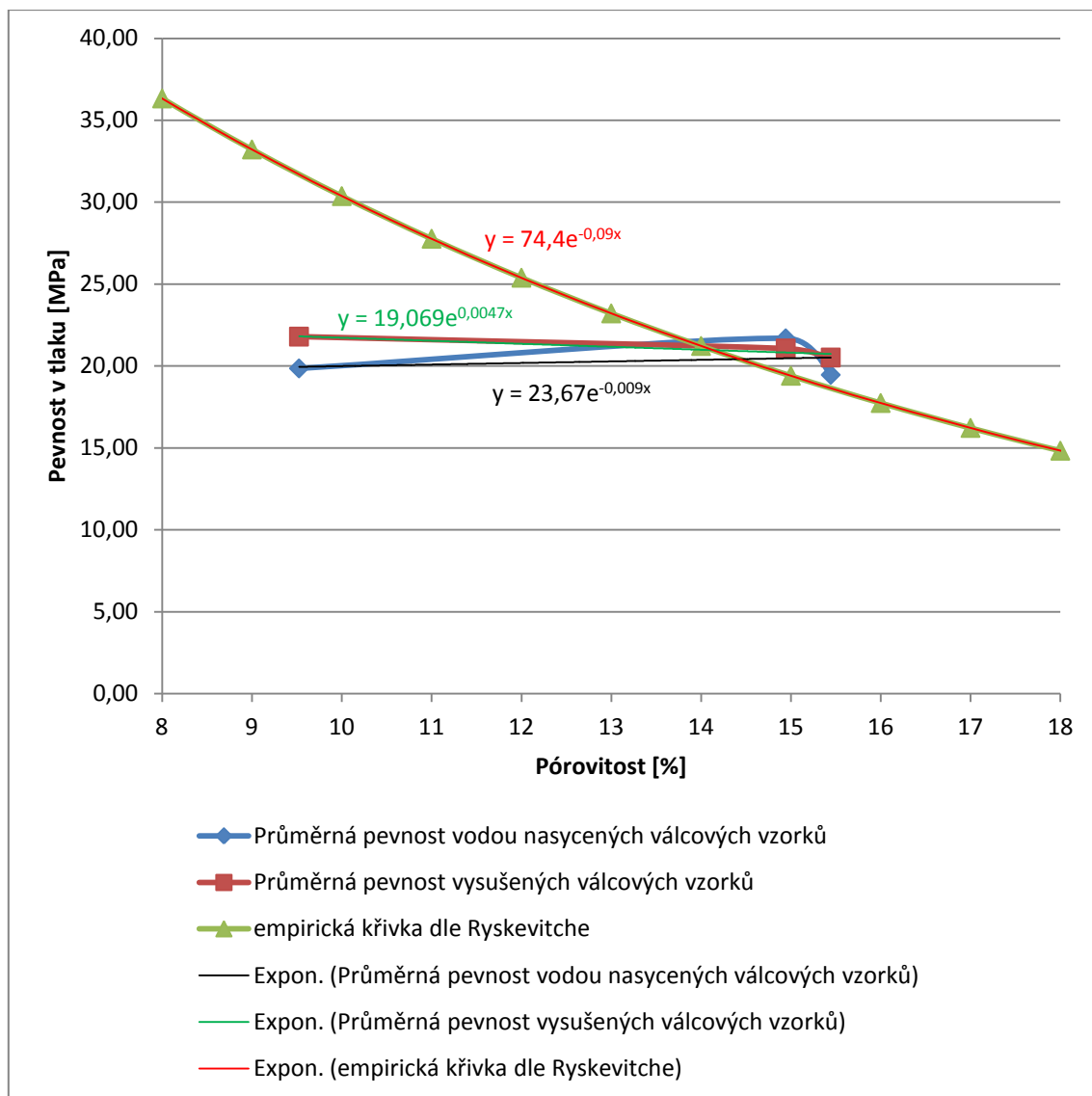


Obr. 56: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí válcových vzorků připravených podle receptury betonu C 30/37 s empirickou křivkou dle Ryskevitche

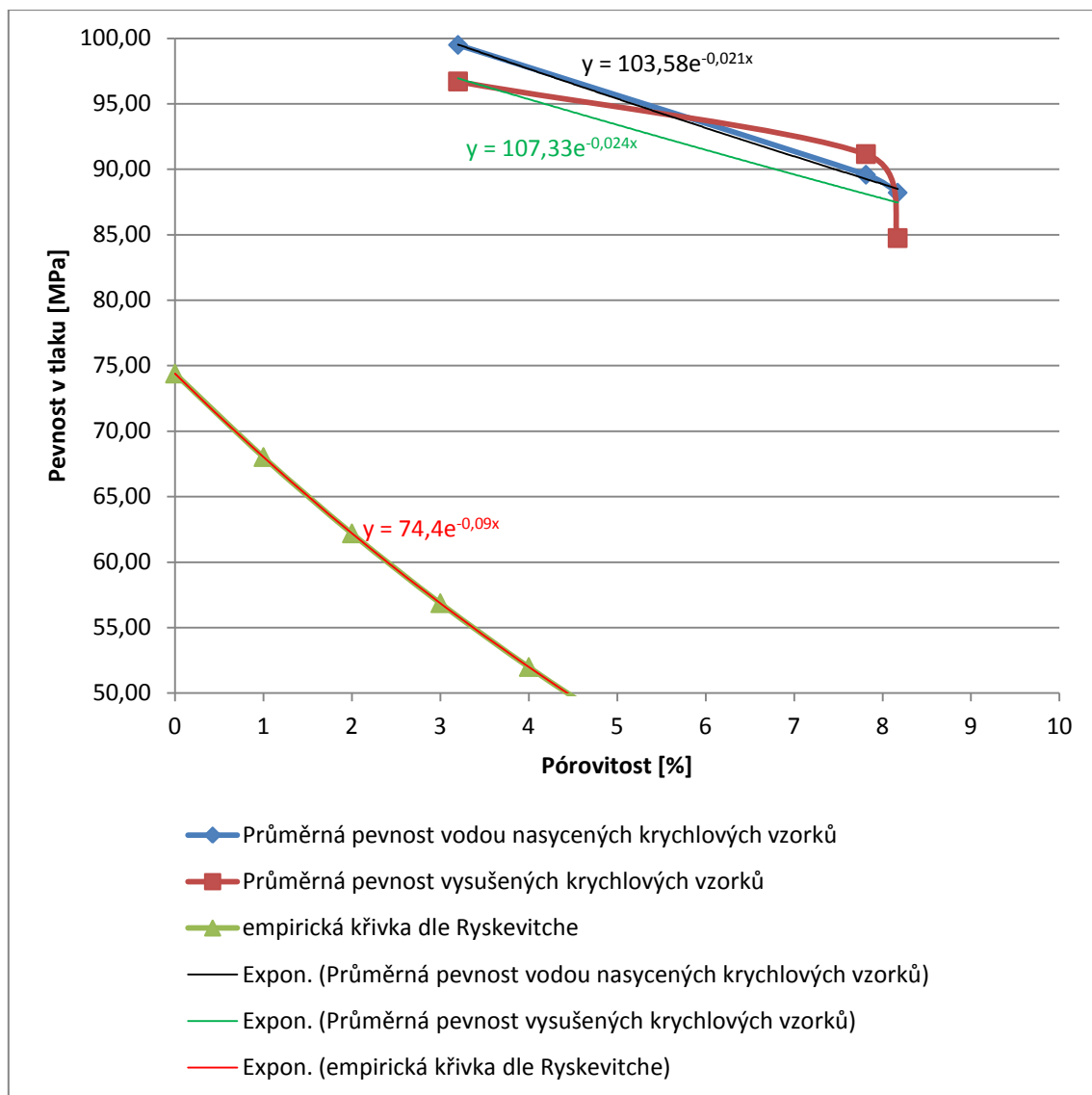




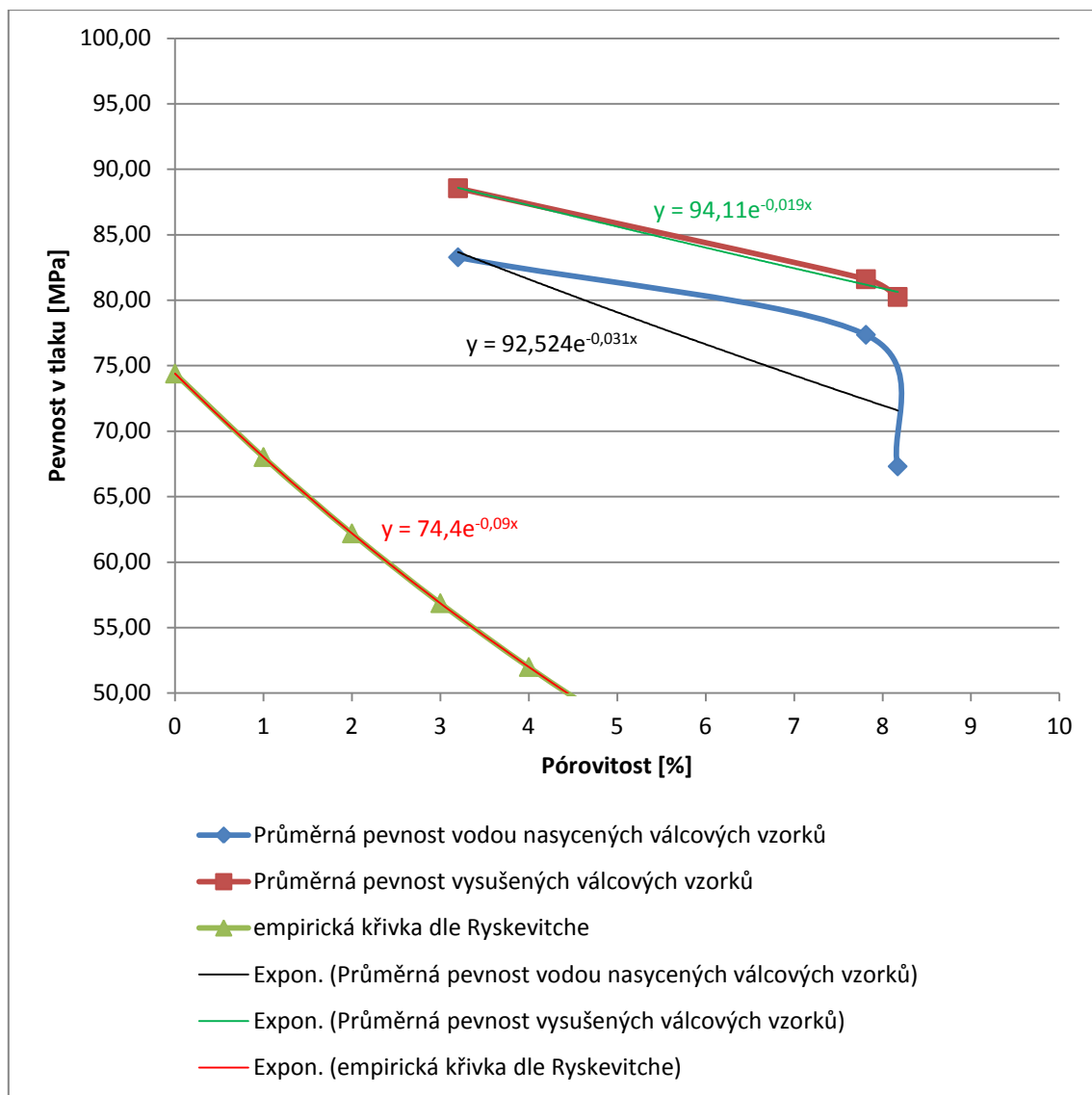
Obr. 57: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí krychlových vzorků připravených podle receptury betonu C 16/20 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha



Obr. 58: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí válcových vzorků připravených podle receptury betonu C 16/20 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha



Obr. 59: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí krychlových vzorků připravených podle receptury betonu C 80/95 s empirickou křivkou dle Ryskevitche



Obr. 60: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí válcových vzorků připravených podle receptury betonu C 80/95 s empirickou křivkou dle Ryskevitche

Díky provedenému experimentálnímu zkoušení (obr. 55 – 60) lze tedy určit rovnice závislosti pevnosti betonu v tlaku na pórovitosti pro každou navrženou recepturu betonu, nasycení vzorku vodou a tvaru vzorku. Tyto vztahy jsou zapsány do tabulky (tab. 26, 27).

Tab. 26: Získané regresní vztahy závislosti pevnosti krychlových vzorků betonu v tlaku na pórovitosti

třída betonu	stav	získané regresní vztahy pro beton
C30/37	vysušený	$102,89 \cdot e^{-0,065 \cdot p}$
	nasycený vodou	$109,93 \cdot e^{-0,075 \cdot p}$
C16/20	vysušený	$34,234 \cdot e^{-0,018 \cdot p}$
	nasycený vodou	$38,234 \cdot e^{-0,032 \cdot p}$
C80/95	vysušený	$107,33 \cdot e^{-0,024 \cdot p}$
	nasycený vodou	$103,58 \cdot e^{-0,021 \cdot p}$

Tab. 27: Získané regresní vztahy závislosti pevnosti válcových vzorků betonu v tlaku na pórovitosti

třída betonu	stav	získané regresní vztahy pro beton
C30/37	vysušený	$84,171 \cdot e^{-0,066 \cdot p}$
	nasycený vodou	$77,797 \cdot e^{-0,062 \cdot p}$
C16/20	vysušený	$19,069 \cdot e^{0,0047 \cdot p}$
	nasycený vodou	$23,67 \cdot e^{-0,009 \cdot p}$
C80/95	vysušený	$94,11 \cdot e^{-0,019 \cdot p}$
	nasycený vodou	$92,524 \cdot e^{-0,031 \cdot p}$

## 7 Závěr

V předložené bakalářské práci byl zkoumán vliv pórovitosti a nasycení vodou vzorků připravených podle navržených receptur betonových směsí na jejich mechanické vlastnosti. Na připravených vzorcích byla určena jejich zdánlivá i skutečná pórovitost, objemová hmotnost, měrná hmotnost, zdánlivá hustota, obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi, konzistenci čerstvého betonu. Dále byly na vzorcích určeny jejich mechanické vlastnosti – pevnost betonu v tlaku a dynamický a statický modul pružnosti.

Na vzorcích byl zejména sledován vliv pórovitosti a nasycení vodou na její mechanické vlastnosti. Ukázalo se, že při zvyšující se pórovitosti značně klesá pevnost betonu v tlaku. Na modulech pružnosti lze také sledovat jistou závislost velikosti modulu pružnosti na pórovitosti, kdy se zvyšující se skutečnou pórovitostí dosahují vzorky nižšího modulu pružnosti. Zde však již vliv pórovitosti na modul pružnosti není tak markantní.

Nevyšší pevnosti u každé navržené receptury bylo dosaženo vždy na vzorcích s nejnižší pórovitostí, naopak nejnižších hodnot dosahovaly vzorky, které obsahovaly nejvíce pórů, což je ve shodě s teoretickými předpoklady. Vliv nasycení vodou na pevnost betonu v tlaku je menší než vliv pórovitosti, přesto však lze sledovat, že u většiny vzorků dosahují vyšších pevností tělesa, která byla před provedením zkoušky vysušena.

Nejvyšší pórovitosti bylo dosaženo u receptury na beton třídy C30/37. To může být způsobeno tím, že tato receptura obsahovala nejvíce vody, díky čemuž mohlo být dosaženo vyšší pórovitosti. Samozřejmě nejvyšší pórovitost měla záměs, do které bylo přidáno nejvíce provzdušňující přísady. Nejnižší pórovitosti naopak dosáhla receptura betonu třídy C80/95, do které nebyla přidána provzdušňující přísada. Tato záměs také dosáhla nejvyšší pevnosti v tlaku.

Práce prokázala, že zvýšením pórovitosti o několik procent lze výrazně snížit výslednou pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti. Prokázán byl také vliv nasycenosti na mechanické vlastnosti. Je tedy zřejmé, že tyto parametry jsou důležité pro dimenzování betonových konstrukcí. Zejména pak mohou mít vliv na konstrukce, které jsou trvale nasyceny vodou nebo u nich dochází ke střídavým změnám obsahu vody.

## 8 Literatura:

- [1] HEIDELBERG CEMENT GROUP. *Příručka technologa - beton: suroviny - výroba - vlastnosti*. 1. vyd. 2010.
- [2] KUMAR, R. a B. BHATTACHARJEE. *Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete*; Cement and concrete research 33 (2003). S. 155 – 164.
- [3] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [4] ČSN EN 206-1: Beton; část 1: *Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, Český normalizační institut, Praha 2001.
- [5] KURKOVÁ, Zuzana a ŽÍDEK Libor. *Návody do cvičení z laboratoří stavebních hmot*. Ostrava: FAST VŠB – TU Ostrava, 2005, 45 s.
- [6] KEARSLEY, E. P. a P. J. WAINWRIGHT. *The effect of porosity on the strength of foamed concrete*; Cement and concrete research 32 (2002). S. 233 – 239.
- [7] KHESTL, Filip. VŠB - TUO. *Zkoušení stavebních hmot a výrobků: Keramika* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly\\_zkouseni](http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly_zkouseni)
- [8] MEC, Pavel. *Modelování pórovitých stavebních materiálů metodou konečných prvků*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB-TUO.
- [9] ČSN 72 1155: *Stanovení nasákavosti a zdánlivé pórovitosti přírodního stavebního kamene*, Úřad pro normalizaci a měření, 1983
- [10] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [11] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. *Modul pružnosti betónu*. [online]. Vydal Betón Ráció, Trnava 2008 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: [http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul\\_pruznosti.pdf](http://www.betonracio.sk/betonracio/downloads/modul_pruznosti.pdf)
- [12] ČSN ISO 6784. *Beton: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 1993.
- [13] ČSN EN 1097-5: *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*, Český normalizační institut, 2008
- [14] ČSN EN 1097-6: *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*, Český normalizační institut, 2001
- [15] ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*, Český normalizační institut, 2009

- [16] ČSN EN 12350-7: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*, Český normalizační institut, 2009
- [17] ČSN EN 12350-6: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*, Český normalizační institut, 2009
- [18] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*, Český normalizační institut, 2009
- [19] ČSN 73 1315: *Stanovení objemové hmotnosti, hustoty, hutnosti a pórovitosti betonu*, Český normalizační institut, 1989
- [20] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Český normalizační institut, 2009
- [21] ČSN EN 933-1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*, Český normalizační institut, 2012
- [22] ČSN EN 12 620: *Kamenivo do betonu*, Český normalizační institut, 2008



## Seznam tabulek:

Tab. 1: Stanovení vlhkosti kameniva .....	23
Tab. 2: Stanovení nasákavosti kameniva .....	24
Tab. 3: Stanovení objemové hmotnosti kameniva .....	25
Tab. 4: Naměřené hodnoty propadu síty těženého kameniva Tovačov frakce 0/4 .....	26
Tab. 5: Naměřené hodnoty propadu síty těženého kameniva Tovačov frakce 4/8 .....	27
Tab. 6: Naměřené hodnoty propadu síty drceného kameniva Bohučovice frakce 4/8 .....	28
Tab. 7: Navržené složení betonové směsi .....	30
Tab. 8: Označení záměsí a množství přidané provzdušňující přísady .....	30
Tab. 9: Klasifikace podle sednutí kužele; S (Slumptest) [1] .....	32
tab. 10: Stanovení konzistence čerstvého betonu sednutím kužele .....	32
Tab. 11: Hodnoty obsahu vzduchu naměřených v jednotlivých záměsích pomocí tlakoměrné metody .....	34
Tab. 12: Objemová hmotnost čerstvého betonu .....	37
Tab. 13 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky .....	39
Tab. 14 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením .....	40
Tab. 15: Stanovení zdánlivé pórovitosti .....	44
Tab. 16: Stanovení zdánlivé hustoty .....	47
Tab. 17: Stanovení nasákavosti vzorků .....	50
Tab. 18: Stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech krychlových vzorků 100 x 100 mm .....	54
Tab. 19: Stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech válcových vzorků .....	57
Tab. 20: Stanovení vlhkosti nasycených vzorků .....	58
Tab. 21: Stanovení dynamického modulu pružnosti .....	61
Tab. 22: Stanovení statického modulu pružnosti .....	66
Tab. 23: Stanovení měrné hmotnosti .....	68
Tab. 24: Stanovení skutečné pórovitosti .....	70
Tab. 25: Průměrné hodnoty mechanických vlastností na vzorcích připravených podle navržených receptur .....	71
Tab. 26: Získané regresní vztahy závislosti pevnosti krychlových vzorků betonu v tlaku na pórovitosti .....	84
Tab. 27: Získané regresní vztahy závislosti pevnosti válcových vzorků betonu v tlaku na pórovitosti .....	84

## Seznam obrázků:

Obr. 1: Závislost pevnosti na pórovitosti dle jednotlivých autorů [2] .....	11
Obr. 2: Schematické zobrazení pevné matrice, pórů a celého elementu [8] .....	12
Obr. 3: Nomogram pro určení vodního součinitele na základě navrhované pevnosti [1].....	14
Obr. 4: Tabulka potřeby vody v l na 1 m <sup>3</sup> betonu na požadovanou konzistenci [1].....	14
Obr. 5: Kamenivo frakce 0/4; 4/8 a 8/16.....	15
Obr. 6: Ideální křivka zrnitosti pro kamenivo s maximálním zrnem kameniva 16 mm. ....	15
Obr. 7: Hodnoty modulů pro hraniční čáry zrnitosti [1] .....	16
Obr. 8: Množství vody potřebné k dosažení navržené konzistence betonu na základě k modulu kameniva [1].....	17
Obr. 9: Zkušební lis používaný k určení pevnosti v tlaku.....	19
Obr. 10: Pyknometr se zátkou .....	20
Obr. 11: Čelistový drtič .....	21
Obr. 12: Otevřený mlýn naplněný nadrceným kamenivem a uzavřený mlýn připravený k mletí.....	21
Obr. 13: Pomletý vzorek připravený k pyknometrické zkoušce .....	22
Obr. 14: Pyknometr .....	25
Obr. 15: Prosévací zařízení .....	26
Obr. 16: Křivka zrnitosti těžného kameniva Tovačov frakce 0/4 .....	27
Obr. 17: Křivka zrnitosti těžného kameniva Tovačov frakce 4/8 .....	28
Obr. 18: Křivka zrnitosti drceného kameniva Bohučovice frakce 8/16.....	29
Obr. 19: Zkušební forma a betonová směs po provedení zkoušky sednutím.....	31
Obr. 20: Grafické znázornění sednutí jednotlivých záměsí .....	32
Obr. 21: Zkušební nádoba pro měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu .....	33
Obr. 22: Grafické znázornění obsahu vzduchu v jednotlivých záměsích .....	34
Obr. 23: Válcová zkušební forma .....	35
Obr. 24: Znázornění objemové hmotnosti jednotlivých záměsí .....	36
Obr. 25: Stanovení rozměrů zkušebního tělesa pomocí posuvného měřítka .....	38
Obr. 26: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých záměsí určené gravimetricky .....	39
Obr. 27: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých záměsí určené hydrostatickým vážením .....	42
Obr. 28: Zkušební těleso vážené pod vodou na hydrostatických vahách.....	42

Obr. 29: Srovnání objemových hmotností určených gravimetricky a vážením na hydrostatických vahách .....	43
Obr. 30: Zdánlivá pórovitost jednotlivých záměsí .....	46
Obr. 31: Zdánlivá hustota jednotlivých záměsí.....	49
Obr. 32: Srovnání zdánlivé hustoty a objemové hmotnosti .....	49
Obr. 33: Nasákavost jednotlivých záměsí .....	52
Obr. 34: Porušení zkušebních vzorků ve zkušebním lisu.....	53
Obr. 35: Srovnání tlakové pevnosti nasycených a vysušených válcových vzorků .....	58
Obr. 36: Srovnání tlakové pevnosti nasycených a vysušených krychlových vzorků.....	59
Obr. 37: Přístroj k určení dynamického modulu pružnosti Proceq Tico.....	60
Obr. 38: Znázornění dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé záměsi .....	64
Obr. 39: Těleso umístěné do zkušebního zařízení při zkoušce stanovení statického modulu pružnosti.....	65
Obr. 40: Znázornění statického modulu pružnosti jednotlivých záměsí .....	67
Obr. 41: Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti .....	67
Obr. 42: Měrná hmotnost jednotlivých záměsí .....	69
Obr. 43: Srovnání zdánlivé a skutečné pórovitosti .....	70
Obr. 44: Množství cementu a vody navržené pro jednotlivé receptury betonu .....	72
Obr. 45: Závislost pórovitosti na množství přidávané provzdušňující přísady.....	72
Obr. 46: Vliv pórovitosti na nasákavost betonu .....	73
Obr. 47: Závislost pevnosti betonu v tlaku krychlových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C30/37 .....	73
Obr. 48: Závislost pevnosti betonu v tlaku válcových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C30/37 .....	74
Obr. 49: Závislost pevnosti betonu v tlaku krychlových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C16/20 .....	74
Obr. 50: Závislost pevnosti betonu v tlaku válcových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C16/20 .....	75
Obr. 51: Závislost pevnosti betonu v tlaku krychlových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C80/95 .....	75
Obr. 52: Závislost pevnosti betonu v tlaku válcových vzorků na pórovitosti u navržené receptury betonu C80/95 .....	76
Obr. 53: Srovnání pevností různých typů vzorků .....	77

Obr. 54: Závislost pórovitosti a obsahu vzduchu v čerstvé betonové směsi.....	77
Obr. 55: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí krychlových vzorků připravených podle receptury betonu C 30/37 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha.....	78
Obr. 56: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí válcových vzorků připravených podle receptury betonu C 30/37 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha.....	79
Obr. 57: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí krychlových vzorků připravených podle receptury betonu C 16/20 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha.....	80
Obr. 58: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí válcových vzorků připravených podle receptury betonu C 16/20 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha.....	81
Obr. 59: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí krychlových vzorků připravených podle receptury betonu C 80/95 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha.....	82
Obr. 60: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot pevností v tlaku a jím příslušných pórovitostí válcových vzorků připravených podle receptury betonu C 80/95 s empirickou křivkou dle Ryskevitcha.....	83

## **Seznam příloh:**

Příloha č. 1: Technický list č. 642 provzdušňující přísady BASF MICRO AIR 103